

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Determinação experimental da infiltração do ar numa casa modelo com arrefecimento solar térmico

João Morais Rebelo



Dissertação em Engenharia Mecânica

Orientador: Szabolcs Varga

21 de Julho de 2015

Resumo

As infiltrações de ar e a ventilação natural são muitas vezes a única forma de promover a renovação de ar nos edifícios do sub-setor residencial e comercial em Portugal. A necessidade do conhecimento dos seus níveis é importante por questões relacionados com a qualidade do ar interior, conforto térmico nos espaços ocupados, como também com problemas de consumo energético. Os dois métodos mais utilizados para caracterizar um espaço no que toca às infiltrações de ar são o ensaio com os gases traçadores e o ensaio da porta ventiladora. Neste trabalho aplica-se estes dois métodos a uma casa modelo com arrefecimento solar térmico.

Numa primeira fase desta dissertação são explicados os dois mecanismos que provocam a existência de fluxos não controlados de ar nos edifícios: efeito chaminé e a incidência do vento. De seguida, faz-se uma descrição dos fundamentos teóricos subjacentes aos dois ensaios aplicados à casa modelo. Selecionou-se o método de declive para a determinação da taxa de infiltrações na casa modelo e o gás traçador utilizado foi o CO_2 . Numa segunda fase é feita uma breve descrição da casa modelo. Esta casa é constituída por painéis de material compósito unidos entre si através de resinas e adesivos estruturais. A sua área de pavimento, o pé-direito, e o volume são 15 m^2 , $2,50\text{ m}$ e $37,5\text{ m}^3$, respetivamente. De seguida foram explicitados todos os procedimentos experimentais adotados para implementação destes dois ensaios na casa modelo.

Os resultados experimentais dos ensaios com os gases traçadores indicam que a taxa de infiltrações média da casa modelo é igual a $2,34 \times 10^{-2}\text{ h}^{-1}$, um valor insuficiente para assegurar a qualidade do ar interior deste espaço. Após a instalação de grelhas de circulação de ar a média dos resultados obtidos foi de $0,99\text{ h}^{-1}$, um valor que garante a taxa mínima de renovação do ar interior segundo a legislação portuguesa vigente.

O ensaio da porta ventiladora fornece um conjunto de indicadores (ELA e I_{50}) que podem correlacionados com a taxa média anual de infiltrações (I). O método foi aplicado apenas quando foram instaladas grelhas de circulação de ar para evitar eventuais danos estruturais na casa modelo. Após a instalação das grelhas os dados experimentais apontam para que $ELA = 0,042\text{ m}^2$, $I_{50} = 34,705\text{ h}^{-1}$ e através da correlação adotada determinou-se que $I = 1,743\text{ h}^{-1}$. A diferença entre os valores de I obtidos pelos dois métodos demonstra a limitação da correlação adotada com o método da porta ventiladora pois esta não tem em conta as condições meteorológicas nem as propriedades do edifício.

Abstract

Air infiltration and natural ventilation are often the only way to promote air exchange in residential and commercial buildings in Portugal. The knowledge of its levels is an important issue since it is related to indoor air quality, thermal comfort in occupied spaces, as well as total energy consumption. There are two frequently methods used to characterize a space regarding to air infiltrations: the blower door test and the tracer-gas method. In this work both of these methods were applied to a solar thermal air conditioned test building.

In the first part of this thesis, the two existing mechanisms of uncontrolled air exchange in buildings are explained: chimney effect and wind effect. Then, a description of the theoretical background underlying the two methods applied to the model house is given. The first order concentration decay method for determining the infiltration rate with CO_2 was used. In a second part, a brief description of the model house is given. This novel building is constituted by composite panels joined together by resins and structural adhesives. It has a floor area of 15 m^2 , a ceiling height of 2.50 m and a volume of $37,5\text{ m}^3$. Later all the experimental procedures adopted for the implementation of these two tests in the model house are explained.

The experimental results with tracer gases method indicate that the average infiltration rate in model house is equal to $2,34 \times 10^{-2}\text{ h}^{-1}$, that is insufficient to ensure the suitable indoor air quality. After the installation of air circulation grids the exchange rate is estimated to have an average of $0,99\text{ h}^{-1}$. This value ensures the recommended minimum air renewal rate according to the current Portuguese legislation.

The blower door test provides a set of indicators (ELA and I_{50}) which may be correlated with the annual average rate of infiltration (I). This test was only applied when air circulation grids were installed in order to prevent any structural damage in the model house caused by the pressurization. Experimental data showed that ELA was $0,042\text{ m}^2$, I_{50} was $34,705\text{ h}^{-1}$, while I was estimated to be $I = 1,743\text{ h}^{-1}$ using an existing correlation.

The difference between the air exchange values obtained by the two methods shows the limitation of the adopted correlation as this does not take into account the weather conditions or the building properties.

Agradecimentos

Quero em primeiro lugar agradecer aos meus pais pelo apoio incondicional prestado em todas as fases da minha vida e ao resto da minha família por estarem sempre do meu lado.

Agradeço ao meu orientador, Szabolcs Varga, por toda a boa disposição, disponibilidade e paciência que teve nos últimos seis meses e por me ter ajudado nas alturas mais complicadas desta dissertação. Ao investigador Paulo Pereira por toda a ajuda na logística dos ensaios experimentais.

Um obrigado em particular ao Eng. José Luís Alexandre por todo o equipamento disponibilizado e pela disponibilidade que demonstrou ao longo deste semestre. À investigadora Karla Gonçalves por prestar auxílio nas atividades experimentais e ao professor Paulo Coelho pela ajuda e esclarecimento na componente da estimativa das incertezas experimentais.

Por fim, a todos meus amigos que me acompanharam nos melhores cinco anos da minha vida.

*“Some people feel the rain.
Others just get wet”*

Bob Marley

Abreviaturas e Símbolos

FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
QAI	Qualidade do ar Interior
V.C	Volume de Controlo
AVAC	Aquecimento Ventilação e Ar Condicionado

Conteúdo

1	Introdução	11
1.1	Preâmbulo	11
1.2	Qualidade do ar interior e conforto térmico	12
1.3	Impacto energético das infiltrações de ar	13
1.4	Objetivos e estruturação da dissertação	15
2	Fundamentos teóricos	17
2.1	Método dos gases traçadores	20
2.1.1	Gases traçadores mais utilizados	20
2.1.2	Conceito de uma zona perfeita	22
2.1.3	Equação de conservação de massa	22
2.1.4	Metodologias de ensaio com a tecnologia dos gases traçadores	23
2.2	Porta ventiladora	28
2.2.1	Estanquidade ao ar	28
2.2.2	Ensaio com a porta ventiladora	30
2.2.3	Indicadores obtidos pelos ensaios	33
2.2.4	Previsão do nível médio das infiltrações com o método da porta ventiladora	35
2.2.5	Normas	36
2.2.6	Limitações e conclusões sobre o método da porta ventiladora	37
2.3	Comparação dos métodos experimentais enunciados	38
3	Metodologia Experimental	39
3.1	Descrição da casa modelo	39
3.2	Método dos gases traçadores	45
3.2.1	Normalização	45
3.2.2	Equipamento utilizado no ensaio dos gases traçadores	45
3.2.3	Ensaio preliminares	56
3.2.4	Análise de incertezas e de propagação de erros	64
3.3	Porta ventiladora	68
3.3.1	Equipamento utilizado no ensaio da porta ventiladora	68
3.3.2	Implementação do ensaio na TDF	71
3.3.3	Ensaio preliminar	74
3.3.4	Análise de incertezas e de propagação de erros	75

4	Apresentação e discussão dos resultados experimentais	79
4.1	Método dos gases traçadores	79
4.2	Porta Ventiladora	95
4.3	Comparação dos resultados obtidos	101
5	Conclusões e trabalhos futuros	103
	Bibliografia	107
	Anexo A: Propriedades dos materiais de construção da TDF	109
	Anexo B: Configurações espaciais das sondas de recolha de ar	113
	Anexo C: Curvas de calibração do ventilador	117
	Anexo D: Condições meteorológicas durante os ensaios dos gases traçadores	119

Lista de Figuras

1.1	Esquema dos balanços térmicos associados a um espaço durante a estação de aquecimento (a) e arrefecimento (b) [5].	13
2.1	Diferenças de pressão causadas pelo efeito chaminé [5].	18
2.2	Diferenças de pressão causadas pela incidência do vento.[5]	18
2.3	a) Diferenças de pressão causadas pelo efeito chaminé (côr-de-laranja) e pela incidência do vento (preto). b) Distribuição de pressão resultante [5].	19
2.4	Representação esquemática dum volume de controle que troca ar com o meio exterior [5].	23
2.5	Representação da evolução da concentração de gás traçador em regime permanente [3].	24
2.6	Evolução exponencial da concentração de gás traçador segundo o método do declive [3].	25
2.7	Evolução linear da concentração de gás traçador segundo o método do declive [3].	25
2.8	Representação da evolução temporal da concentração de gás traçador através do método da injeção de gás traçador constante [3].	26
2.9	Representação da evolução da concentração de gás traçador em regime transitório [3].	27
2.10	Contributo dos diferentes elementos construtivos nas infiltrações de ar, (Adaptado de [13]).	28
2.11	Principais percursos de passagem de ar [11].	29
2.12	Esquema de principio da porta ventiladora [3].	30
2.13	Exemplo de curvas de pressurização e despressurização [11].	31
2.14	Variação de ELA com o ΔP adotado [3].	34
3.1	Desenho esquemático do sistema SOLAC-TDF, (Adaptado de [15]). .	40
3.2	Desenho tridimensional da casa das máquinas com as dimensões mais relevantes [15].	41
3.3	Desenho tridimensional da TDF com as suas principais dimensões [15].	41
3.4	Desenho tridimensional da cobertura exterior do edificio L da FEUP.[15]	42
3.5	Desenho tridimensional da cobertura depois da colação dos compartimentos e equipamentos [15].	42
3.6	TDF e casa das máquinas fixadas com cabos de aço [15].	43
3.7	Representação esquemática da ligação cobertura-parede (a) e da ligação parede parede (b), (Adaptado de [16]).	44
3.8	Fotografia da junção cobertura-parede (a) e junção parede-parede (b).	44

3.9	Reservatório de CO_2	46
3.10	Reservatório de CO_2 : a) válvula redutora de pressão, b) manómetro, c) válvula redutora de pressão, d) manómetro, e) regulador de pressão	46
3.11	Balança e respetivo mostrador digital utilizada para medir a massa de CO_2 a introduzir na TDF.	48
3.12	Tubo transportador de gás traçador (a) e cabo de eletricidade (b) e implementados na parede norte da TDF.	48
3.13	Injeção de CO_2 a partir do exterior da TDF.	49
3.14	Distribuição de CO_2 no interior da TDF.	49
3.15	Analizador multi-gás foto acústico modelo 1312 da INNOVA.	50
3.16	Sistema de medição do equipamento <i>Photoacoustic multi gas analyzer</i> 1312, (Adaptado de [18]).	51
3.17	Representação esquemática da amostragem através de intervalos fixos, (Adaptado de [18]).	52
3.18	Testo 400 e sonda de medição de CO_2	53
3.19	Fotografia das sondas de recolha de ar.	54
3.20	Representação esquemática da sonda de recolha de ar.	55
3.21	Evolução temporal da concentração de CO_2 no ensaio realizado dia 9 de Abril.	57
3.22	Regressão linear feita aos resultados experimentais referentes ao ensaio de 9 de Abril.	58
3.23	Abertura da janela durante os 2 ensaios experimentais preliminares.	60
3.24	Localização da sonda de medição durante o ensaio de 28 de Abril.	60
3.25	Localização da sonda de medição durante o ensaio de 29 de Abril.	61
3.26	Evolução temporal da concentração de CO_2 no ensaio realizado dia 28 de Abril (a) e no dia 29 de abril (b).	62
3.27	Regressão linear feita aos resultados experimentais de dia 28 de Abril (a) e de dia 29 de Abril (b).	63
3.28	Representação esquemática de alguns conceitos relacionados com a análise de incertezas [21].	64
3.29	Moldura de madeira de dimensões reguláveis.	68
3.30	Lona.	69
3.31	Ventilador reversível com velocidade variável	69
3.32	Manómetros diferenciais utilizados no ensaio. a) manómetro utilizado para medir ΔP , b) manómetro utilizado para medir ΔP_{VENT} com fim de escala de 125 Pa, c) manómetro utilizado para medir ΔP_{VENT} com fim de escala de 500 Pa.	70
3.33	a) Isolamento da moldura de madeira com a lona, b) Moldura isolada implementada na TDF.	71
3.34	Instalação do ventilador na moldura isolada.	72
3.35	Medição da pressão interior.	72
3.36	Medição da pressão a montante do ventilador.	73
3.37	a) Esquema do ensaio de pressurização, b) Esquema do ensaio de despressurização.	73
3.38	Ligação cobertura-parede danificada após a realização do ensaio com a porta ventiladora.	74

3.39	Ligação cobertura-parede danificada após a realização do ensaio com a porta ventiladora.	75
4.1	Caixa integradora.	80
4.2	Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio A.	81
4.3	Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio A após os 300 min de ensaio.	81
4.4	Regressão linear aplicada aos dados experimentais referentes ao ensaio A.	82
4.5	Termo-resistência RTD de 4 fios utilizado para medir T_{int} durante os ensaios experimentais.	82
4.6	Representação esquemática da localização da termo-resistência RTD de 4 fios.	83
4.7	Grelhas de circulação de ar instaladas na parede orientada a oeste.	87
4.8	Grelha de circulação de ar instalada na parede orientada a sul.	87
4.9	Grelha de circulação de ar instalada na parede orientada a norte.	88
4.10	Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio G.	89
4.11	Regressão linear aplicada aos dados experimentais referentes ao ensaio G.	89
4.12	Curvas de pressurização e depressurização referentes aos dois ensaios.	97
4.13	Curva média dos dois ensaios.	99
4.14	Valores do fator climático (C) nos estados E.U.A,(Adaptado de[11]).	100

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens dos gases traçadores mais utilizados, (Adaptado de [9]).	21
2.2	Normas para ensaio de pressurização, (Adaptado de [3]).	36
2.3	Valores máximos de I_{50} , (Adaptado de [3])	37
2.4	Comparação dos métodos existentes para a determinação de características de edifícios, (Adaptado de [3]).	38
3.1	Tempos de integração disponíveis no equipamento <i>Photoacoustic multi gas analyzer</i> 1312 em função da velocidade de medição, (Adaptado de [18]).	52
3.2	Tempo de resposta do equipamento <i>Photoacoustic multi gas analyzer</i> 1312, (Adaptado de [18]).	53
3.3	Dados técnicos relevantes do ensaio realizado dia 9 de Abril.	56
3.4	λ e R^2 em função de T_a	58
3.5	Duração mínima recomendada de ensaio em função de λ , (Adaptado de [10]).	59
3.6	Exatidão dos equipamentos utilizados nos ensaios com os gases traçadores.	66
4.1	Dados técnicos durante os ensaios A, B, C e D.	84
4.2	Condições meteorológicas técnicas durante os ensaios A, B, C e D.	85
4.3	Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os quatro ensaios.	86
4.4	Dados técnicos referentes ao ensaios E, F, G e H.	91
4.5	Condições meteorológicas durante os ensaios E, F, G e H.	92
4.6	Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os ensaios E, F, G e H.	93
4.7	Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os oito ensaios.	94
4.8	Resultados obtidos no ensaio primeiro com a porta ventiladora.	95
4.9	Resultados obtidos com o segundo ensaio com a porta ventiladora.	95
4.10	Dados meteorológicos durante os ensaios da porta ventiladora.	96
4.11	Procedimento de cálculo da curva média.	98
4.12	Valores do fator de correção de altura (J) [11].	100
4.13	Valores do fator de correção da proteção ao vento (K) [11].	100
4.14	Valores do fator de correção do tamanho das fendas (O) [11].	100
4.15	Resumo dos resultados obtidos com os dois ensaios da porta ventiladora.	101

Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Descrição
B_X	—	Incerteza sistemática de uma mensurada X
C_0	kg/m^3	Concentração inicial de um determinado gás
C_a	kg/m^3	Concentração exterior de um determinado gás
C_d	—	Coefficiente de descarga do escoamento
C_p	—	Coefficiente de pressão
$C_s(t)$	kg/m^3	Concentração interior de um determinado gás no instante t
\dot{E}	Kg/s	Taxa de remoção de um determinado gás
ELA	m^2	Área efetiva de frinchas
\dot{G}	Kg/s	Taxa de geração de um determinado gás
h_{ext}	$kJ/kg \cdot K$	Entalpia do ar exterior
h_{int}	$kJ/kg \cdot K$	Entalpia do ar interior
I	h^{-1}	Taxa média anual de infiltrações
I_{50}	h^{-1}	Número de renovações horárias a $\Delta P = 50Pa$
K	—	Coefficiente de escoamento
m_{CO_2}	g	Massa de CO_2 a introduzir em cada ensaio
\dot{m}_{inf}	kg/s	Caudal mássico de infiltrações
n	—	Expoente de escoamento
P_{atm}	Pa	Pressão atmosférica
P_{ext}	KPa	Pressão atmosférica na altura de ensaio
P_X	—	Incerteza aleatória de uma mensurada X
\dot{Q}_{aquec}	W	Carga térmica de aquecimento
\dot{Q}_{arref}	W	Carga térmica de arrefecimento
\dot{Q}_{cond}	W	Carga térmica de condução
\dot{Q}_{inf}	W	Carga térmica de infiltração
\dot{Q}_{int}	W	Carga térmica interior
\dot{Q}_{solar}	W	Carga térmica solar
\dot{Q}_{vent}	W	Carga térmica de ventilação

Símbolo	Unidades	Descrição
r_n	h^{-1}	Taxa de renovação natural do ar
S_Y	—	Erro padrão da variável dependente num regressão linear
T_0	$^{\circ}C$	Temperatura de calibração do ventilador
T_{ext}	$^{\circ}C$	Temperatura do ar exterior ao espaço a testar
T_{int}	$^{\circ}C$	Temperatura do ar interior
U_m	m/s	Velocidade média de escoamento dentro de um difusor
U_{mf}	m/s	Velocidade média do escoamento que atravessa uma frincha
V	m^3	Volume de ar contido num determinado espaço
\dot{V}	m^3/s	Caudal volúmico de ar
\dot{V}_{corr}	m^3/s	Caudal volúmico de ar real
\dot{V}_{med}	m^3/s	Caudal volúmico de ar em condições de calibração
v_{vento}	m/s	Velocidade do vento
ΔP	Pa	Diferença de pressão
ΔZ	m	Distância entre um ponto da envolvente e o eixo neutro
δ_X	—	Incerteza total de uma mensurada X
λ	h^{-1}	Numero de renovações de ar por hora
ρ_a	kg/m^3	Massa volúmica do ar interior
ρ_i	kg/m^3	Massa volúmica do ar exterior

Capítulo 1

Introdução

1.1 Preâmbulo

A crescente sensibilidade da opinião pública para problemas ambientais tem levado a que nos últimos anos se tenha verificado um desenvolvimento considerável no desempenho energético dos edifícios de serviços e de habitação. Tendo isto em vista são muitos os engenheiros e investigadores que se debruçam sobre o projeto e manutenção dos sistemas de Aquecimento Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) a implementar em edifícios novos ou já existentes. Com um projeto cuidado e rigoroso dos sistemas AVAC consegue-se ao mesmo tempo poupar energia, alcançar uma adequada qualidade do ar interior e ainda garantir o conforto térmico de todos os ocupantes [1].

Muitas vezes as infiltrações não são tidas em conta aquando do projeto dos sistemas AVAC levando a que na realidade seja gasta mais energia do que o inicialmente previsto ou em casos mais extremos em que quer a qualidade do ar interior quer o conforto térmico não sejam garantidos. A caracterização adequada dum edifício no que toca às eventuais infiltrações presentes é uma tarefa bastante complexa. Como será melhor explicado mais adiante, as infiltrações estão fortemente dependentes das condições climáticas (sempre em mudança) e também da própria construção dos edifícios [2].

Devido á complexidade da determinação das infiltrações vários estudos tem sido efetuados em edifícios um pouco por todo mundo mas com principal incidência nos climas frios sendo de destacar a Europa do Norte, Canadá e o norte dos E.U.A. Mais recentemente, e com o intuito principal de poupar energia, tem-se feito estudos em edifícios no Sul da Europa e ainda no mediterrâneo [3].

Nas próximas duas secções são abordados três temas fulcrais no contexto das infiltrações: qualidade do ar interior, conforto térmico e ainda o impacto que estas têm nos consumos energéticos dos edifícios. Na última secção deste capítulo explicitam-se os objetivos e a organização da presente dissertação.

1.2 Qualidade do ar interior e conforto térmico

A qualidade do ar interior (QAI) e o conforto térmico são dois conceitos pertinentes no contexto das infiltrações e antes de passar à sua definição é importante perceber como surgiu o interesse por este tipo de temas na sociedade. Embora os autores da antiguidade clássica já se referirem ao ar poluído, foi com o decorrer da revolução industrial e a crescente preocupação com a higiene e segurança dos espaços interiores que se começou a refletir sobre melhores condições de trabalho ao nível da qualidade do ar interior [4].

A crise petrolífera mundial vivida na década de 1970 fez com que fossem levados a cabo vários esforços para tornar os edifícios mais eficientes do ponto vista energético. Assim, com o intuito de evitar perdas energéticas pela envolvente, começaram a ser construídos edifícios com elevada estanquidade (ver secção 2.2.1), provocando uma diminuição da ventilação natural e, conseqüentemente, um aumento da concentração de poluentes no seu interior. Nesta altura também se assistiu a um forte aumento da procura de materiais sintéticos e químicos para a construção e decoração de edifícios incrementando o número de fontes poluidoras do ar interior já por si pouco renovado [4]. Estes factos associados ao aparecimento de problemas na saúde humana originaram uma sensibilização da sociedade para os problemas da QAI a par com eficiência energética dos edifícios. Recentemente a *Environmental Protection Agency* (EPA) e *Science Advisory Board* (SAB) classificam a poluição do ar interior como um dos cinco principais riscos ambientais para a saúde pública [2].

Frequentemente, alguns ocupantes de espaços interiores apresentam sintomas na sua saúde, tais como, dores de cabeça, náusea, fadiga, sonolência, irritação dos olhos, nariz entupido, dores de garganta, etc [2]. Apesar de não ser possível atribuir o aparecimento destes sintomas a uma causa concreta, verificou-se que estes são aliviados após a saída dos ocupantes do edifício o que leva a crer que a QAI nesses casos está comprometida. A QAI de um determinado espaço está assegurada quando a exposição dos ocupantes aos poluentes químicos físicos e biológicos ocorrem a níveis adequados à saúde humana. O conjunto de sintomas descritos anteriormente, é reconhecido desde 1983, pela OMS, como o síndrome do edifício doente (em inglês *Sick Building Syndrome*) [4].

O conforto térmico apesar de estar associado com a QAI está relacionado com uma complexa combinação de fatores, como sejam, as fontes de poluição do ar (interiores ou exteriores; físicas químicas e biológicas) e as suas interações, as condições ambientais, os materiais e estrutura do edifício, a atividade, comportamento e o número de ocupantes, os sistemas de AVAC implementados, a taxa de renovação de ar e até mesmo a percepção sensorial de cada indivíduo [3].

A principal forma de garantir a QAI num determinado espaço é através da renovação do ar interior. A renovação do ar pode ser mecânica (sistemas climatização) ou natural (ventilação natural e infiltrações). Visto que em Portugal a grande maioria de edifícios não possui sistema de climatização, as infiltrações muitas das vezes são a única forma de se conseguir a renovação do ar interior, logo se for promovida uma

diminuição excessiva das infiltrações pode-se correr o risco de expor os ocupantes destes espaços a concentrações de poluentes para além de limites aceitáveis [3]. Por outro lado, se a taxa de infiltrações for excessivamente elevada é muito provável que se provoque um desconforto térmico acentuado e ainda um aumento substancial das necessidades de energia dos edifícios como será explicado na seguinte secção.

1.3 Impacto energético das infiltrações de ar

Antes de se analisar com detalhe o impacto energético das infiltrações de ar é imprescindível ter em conta todas as variáveis que entram em jogo aquando da estimativa das necessidades energéticas de um edifício sendo para tal necessário conhecer-se as diferentes cargas térmicas existentes, estas são determinadas através de um balanço térmico feito ao espaço em estudo. De um modo geral as componentes que contribuem para a carga térmica anteriormente descrita são [5]:

- Ganhos/perdas térmicas pela envolvente opaca;
- Ganhos/perdas térmicas nos vãos envidraçados;
- Ventilação e infiltrações;
- Ganhos internos incluindo: equipamentos, iluminação e ocupação

Ao contabilizar todas cargas térmicas de um determinado espaço, em facto, realiza-se um balanço entre ganhos e perdas de energia térmica. Como é de esperar, este balanço é um processo fortemente dinâmico que apresenta variações diárias, mensais e sazonais. Em Portugal pode-se definir duas épocas do ano: aquecimento e arrefecimento dando origem às cargas térmicas de aquecimento e arrefecimento, respetivamente. De seguida apresenta-se a Figura 1.1 que esquematiza os balanços térmicos anteriormente descritos:

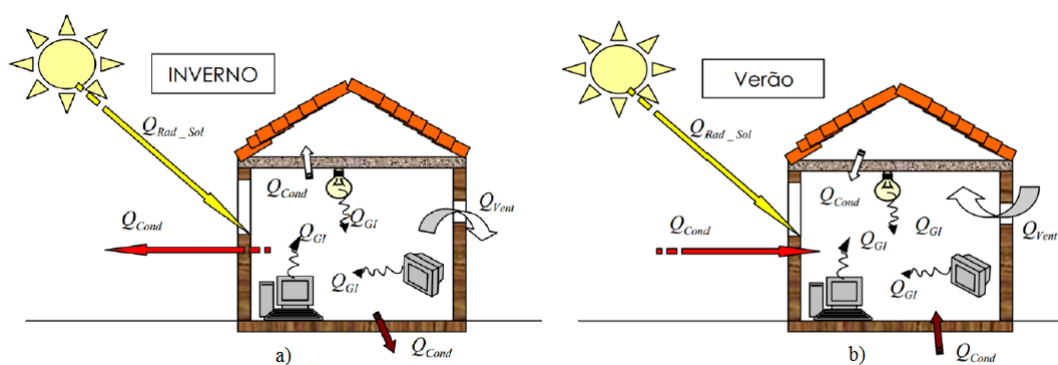


Figura 1.1: Esquema dos balanços térmicos associados a um espaço durante a estação de aquecimento (a) e arrefecimento (b) [5].

Assumindo que T_{int} é constante e desprezando o efeito da inércia (não há acumulação de energia térmica) pode-se fazer os seguintes balanços estacionários:

$$\dot{Q}_{aquec} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{inf} - \dot{Q}_{int} - \dot{Q}_{solar} \quad (1.1)$$

Sendo a carga de arrefecimento definida pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_{arref} = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{int} + \dot{Q}_{solar} \quad (1.2)$$

É interessante verificar que as cargas \dot{Q}_{int} e \dot{Q}_{solar} nas equações 1.1 e 1.2 apresentam sinais diferentes, enquanto as restantes cargas térmicas apresentam o mesmo sinal. Pode-se então concluir que \dot{Q}_{int} e \dot{Q}_{solar} aumentam a carga térmica de arrefecimento e diminuem a carga térmica de aquecimento, já as restantes cargas térmicas provocam um aumento da carga térmica total independentemente da época do ano a considerar.

Tendo sido esclarecido a metodologia de determinação das necessidades energéticas de um edifício/espço e as diferentes variáveis em jogo, pode-se começar a analisar com mais detalhe a carga térmica introduzida num espaço devido à presença de infiltrações de ar. A carga térmica \dot{Q}_{inf} no caso mais simples pode ser determinada recorrendo à seguinte equação:

$$\dot{Q}_{inf} = \dot{m}_{inf} \times (h_{ext} - h_{int}) \quad (1.3)$$

Na equação 1.3 \dot{m}_{inf} é o caudal mássico das infiltrações existente no espaço, h_{ext} e h_{int} se referem à entalpia do ar exterior e interior, respetivamente. Através da equação 1.3 é fácil perceber o porquê de \dot{Q}_{inf} ser um processo instacionário pois, o caudal de infiltrações e as entalpias do ar em jogo (interior e exterior) variam ao longo do dia.

O que se pode aferir desde já é que apesar de aparentemente simples, o papel das infiltrações nos consumos energéticos é bastante complexo sendo então fulcral determinar-se valores concretos do peso das infiltrações de ar nas carga de arrefecimento e aquecimento de um determinado espaço em que se pretenda, por exemplo, reduzir o consumo de energia do sistema AVAC implementado. De acordo com [6] estima-se que nos E.U.A cerca de 6 a 8 % da energia destinada à climatização de edifícios de serviços e habitação sejam "desperdiçados" devido a infiltrações de ar. Nos trabalhos de investigação levados a cabo em [7] chegou-se à conclusão que, dependendo da qualidade e soluções construtivas adotadas, até 50 % da energia gasta em aquecimento e arrefecimento seja utilizada para contrariar o efeito das infiltrações de ar.

Em conclusão, é necessário estimar o impacto das infiltrações de ar nas cargas térmicas totais de um determinado espaço, por um lado para dimensionar o sistema de climatização a implementar de forma mais adequada, por outro lado equacionar soluções construtivas que promovam um aumento ou diminuição da taxa de infiltrações.

1.4 Objetivos e estruturação da dissertação

Na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto durante o período a que esta dissertação diz respeito, esteve em desenvolvimento um projeto de investigação que cujo objetivo é projetar e construir a primeira casa em Portugal cuja climatização é assegurada única e exclusivamente por energia solar. Para tal, construiu-se e implementou-se uma casa modelo nos terrenos da FEUP (mais detalhes na secção 3.1) com o objetivo de verificar se as soluções tecnológicas adotadas conseguem satisfazer as exigências de projeto. Existe assim a necessidade de uma monitorização a longo prazo do desempenho energético e das cargas térmicas existentes na casa modelo. Para que estas sejam caracterizadas adequadamente é imprescindível perceber e quantificar o papel das infiltrações. Esta dissertação insere-se neste projeto de investigação para que seja feita uma caracterização adequada das cargas térmicas e também conhecer o comportamento da casa modelo relativamente aos caudais de ar trocados com o exterior.

Neste primeiro capítulo fez-se uma breve explicação dos motivos que levaram à realização desta dissertação, sendo que resumidamente se pode afirmar que o estudo das infiltrações de ar é relevante para assegurar a QAI, conforto térmico e ainda evitar perdas significativas de energia térmica. Estas e outras razões levam a que o principal objetivo desta dissertação seja a determinação, através de dois métodos distintos, da taxa de infiltrações de ar na casa modelo.

Para além do presente capítulo introdutório, esta dissertação compreende mais quatro outros capítulos:

- No capítulo 2 descrevem-se os fundamentos teóricos dos dois métodos selecionados para a determinação da taxa de infiltrações na casa modelo. No final ainda se faz uma breve comparação entre os dois métodos e uma enumeração das vantagens e desvantagens de cada um.
- No capítulo 3 apresenta-se uma breve descrição da casa modelo, alvo de estudo nesta dissertação. De seguida explica-se pormenorizadamente todos os procedimentos experimentais adotados para levar a cabo a determinação da taxa de infiltrações segundo os dois métodos já anteriormente mencionados. Faz-se também uma análise de incertezas e de propagação de erros em cada um destes dois métodos.
- No capítulo 4 expõe-se todos os resultados obtidos pela implementação dos gases traçadores e porta ventiladora e ainda. No final deste capítulo comparam-se os resultados obtidos e ainda se explicam as eventuais diferenças encontradas.
- No capítulo 5 enumeram-se as conclusões gerais com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados bem como algumas perspetivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

As infiltrações estão sempre presentes em menor ou em maior grau, devendo ser controladas tanto quanto possível para evitar que atinjam valores excessivamente altos ou baixos pelas razões explicitadas nas secções 1.2 e 1.3. O principal fator que distingue as infiltrações da ventilação natural é o facto destas se tratarem de um movimento não controlado do ar através da envolvente dos edifícios. No caso da ventilação natural, o movimento de ar é resultado do fluxo através de aberturas voluntárias, permanentes ou sob o controle dos utilizadores [6].

A existência deste movimento não controlado do ar é promovido pelo diferencial de pressões entre o interior e o exterior dos edifícios, sendo que as frinchas e outras aberturas (não controláveis) existentes na envolvente dos mesmos exercem uma maior ou menor resistência á passagem do fluxo de ar [5]. Por sua vez o diferencial de pressões anteriormente descrito é promovido por dois mecanismos:

Efeito chaminé: As diferenças de pressão originadas por este efeito estão relacionadas com o facto da temperatura do ar no interior dos edifícios ser diferente da temperatura exterior. Caso a temperatura interior seja superior à temperatura exterior o que acontece é que a diferença na massa volúmica do ar provoca uma pressão interior negativa ao nível inferior do edifício e uma pressão interior positiva ao nível superior do edifício. O inverso ocorre quando a temperatura interior for inferior à exterior. As diferenças de pressão, juntamente com a presença de aberturas (janelas, frinchas, etc) provocam caudais de ar no sentido das pressões decrescentes [5].

Na Figura 2.1 mostra-se como o efeito chaminé contribui para as diferenças de pressão anteriormente descritas. No instante a que esta figura se refere a temperatura interior é inferior à exterior sendo que as setas a laranja representam a magnitude dos diferenciais de pressão na envolvente. As setas no sentido positivo do eixo dos X representam uma pressão interior positiva, enquanto que as orientadas no sentido negativo dizem respeito a uma pressão interior negativa. A linha a tracejado (laranja) diz respeito ao nível neutro da envolvente. Nos pontos da envolvente contidos no nível neutro verifica-se que $\Delta P = 0$.

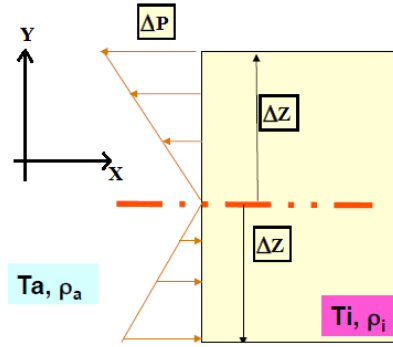


Figura 2.1: Diferenças de pressão causadas pelo efeito chaminé [5].

É possível estimar a diferença de pressão devido a esta diferença de temperaturas para cada ponto da envolvente pela seguinte equação:

$$\Delta P = (\rho_a - \rho_i) \cdot g \cdot \Delta Z \quad (2.1)$$

Na equação 2.1 ρ_a e ρ_i são massa volúmica do ar exterior e interior, respetivamente. De referir que ΔZ trata-se da distância na vertical do ponto da envolvente a considerar até ao nível neutro do edifício (ver Figura 2.1).

Efeito do vento: Nas fachadas sujeitas à incidência do vento existe uma sobrepressão, enquanto que na fachada oposta verifica-se uma depressão como aparece exemplificado na fig 2.2.

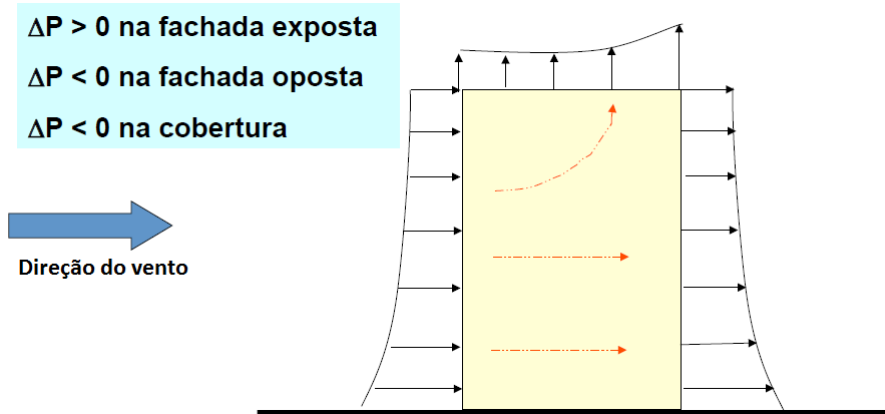


Figura 2.2: Diferenças de pressão causadas pela incidência do vento.[5]

Recorrendo às equações da mecânica dos fluidos é possível calcular , para um ponto qualquer da envolvente, a pressão exercida pelo vento:

$$P = P_{atm} + \frac{\rho \cdot v_{vento}^2}{2} \cdot Cp \quad (2.2)$$

Em que v_{vento} se refere à velocidade com que o vento incide sobre a fachada e C_p diz respeito ao coeficiente de pressão. C_p varia entre -1 e 1 ao longo da fachada mas muitas vezes são adotados valores médios (0.65 por exemplo). Este valor pode ser calculado analiticamente para geometrias muito simples tais como cubos e paralelepípedos, contudo, para geometrias mais complexas só é possível obter valores de C_p por simulação ("*Computational Fluid Dynamics*") ou por medição em túneis de vento em modelos à escala [5].

Os dois mecanismos acima descritos não atuam de forma independente, o caudal total de ar não é apenas igual à soma dos caudais referentes a cada um dos mecanismos. Verifica-se que o caudal total de infiltrações é inferior à soma dos dois efeitos separados. O efeito combinado destes dois mecanismos provoca uma distribuição de pressões na envolvente bastante complexa e de natureza dinâmica pois o vento muda constantemente de direção e de intensidade bem como a temperatura exterior que está constante mudança. Na Figura 2.3 pode-se ver o efeito combinado destes dois mecanismos para um dado instante do tempo. Na imagem à esquerda (a) as setas a cor-de-laranja representam as diferenças de pressão devido ao efeito chaminé enquanto que as setas a preto dizem respeito ao efeito do vento. Na imagem à direita (b) observa-se distribuição de pressão resultante que resulta da soma dos dois efeitos.

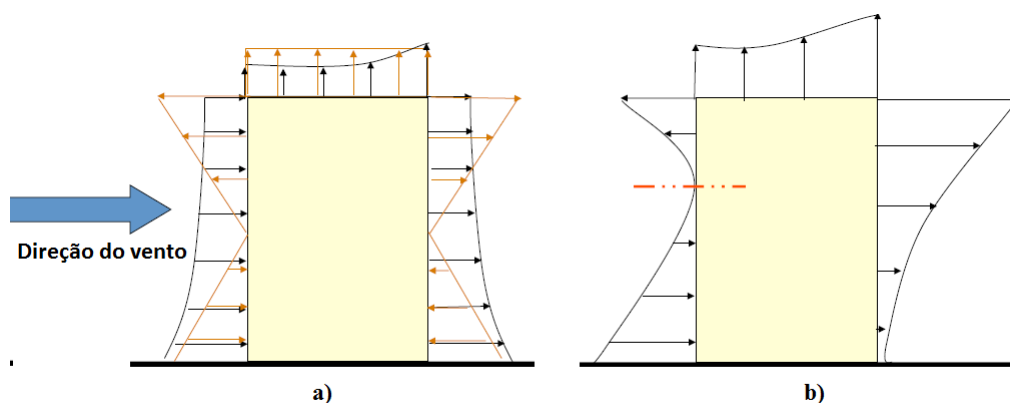


Figura 2.3: a) Diferenças de pressão causadas pelo efeito chaminé (côr-de-laranja) e pela incidência do vento (preto). b) Distribuição de pressão resultante [5].

Contudo a caracterização da distribuição de pressões bem como outros fatores como: forma e dimensão do edifício, dimensão e localização das frinchas é por vezes muito difícil ou mesmo impossível, o que torna o cálculo analítico da taxa de infiltrações inviável tendo em vista uma precisão aceitável [3].

Tendo em conta a dificuldade do cálculo analítico das infiltrações pelas razões expostas anteriormente, desenvolveram-se metodologias experimentais que permitem determinar as taxas de infiltrações nos edifícios, que podem ser classificadas [8]:

- comprimento total das frinchas
- pressurização (porta ventiladora)
- gases traçadores

É de salientar que o primeiro método enunciado é utilizado predominantemente para a determinação de cargas térmicas de projeto em edifícios, ou seja, para que seja possível estimar a potência térmica dos diferentes sistemas a implementar sendo normalmente designados por métodos de cálculo. Os dois últimos métodos implicam a medição de grandezas físicas pelo que são normalmente designadas métodos de medição e através destes torna-se possível estimar a taxa de infiltrações, área das frinchas e ainda outras características da envolvente que serão descritas nas seguintes secções deste capítulo [3]. De seguida faz-se uma descrição pormenorizada dos fundamentos teóricos relativos aos dois métodos utilizados para a medição da taxa de infiltrações na casa modelo: método dos gases traçadores e porta ventiladora enumerando também as vantagens e desvantagens inerentes a cada um deles.

2.1 Método dos gases traçadores

A medição da taxa de infiltrações de ar pelo método dos gases traçadores baseia-se na introdução de um gás ("*tracer*") no interior do espaço a estudar e posteriormente monitorizar a evolução da sua concentração ao longo do tempo [9]. Apesar de se tratar dum método bastante simples do ponto de vista conceptual tem considerações teóricas importantes que vão ser abordadas ao longo desta secção.

Na literatura existem muitas publicações que estudam a aplicação deste método para medir a taxa de infiltrações em edifícios com várias zonas (definição de zona na secção 2.1.2). Uma vez que a casa modelo estudada no presente trabalho é constituída apenas por uma zona, a determinação da taxa de infiltrações para este tipo de configuração apenas será abordada.

2.1.1 Gases traçadores mais utilizados

Tendo em vista a correta determinação da taxa de infiltrações, o gás traçador utilizado deverá possuir as seguintes características [9]:

- Segurança: a presença do gás traçador não deverá constituir um perigo para as pessoas, materiais ou atividades que decorrem dentro ou nas imediações do espaço de teste, consequentemente pode-se afirmar que o gás traçador deve ser não-tóxico, não-inflamável e não-alérgico.
- Não-reativo: como a evolução temporal da concentração do gás traçador vai ser utilizada para aferir a taxa de infiltrações é importante que o gás traçador utilizado não reaja quimicamente ou fisicamente com nenhum componente do espaço em estudo.
- Insensibilidade: O gás traçador utilizado não deverá de forma alguma alterar o processo em estudo o que na prática implica que um gás traçador ideal não deverá afetar nem o caudal de infiltrações nem a densidade do ar no interior do espaço em estudo.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens dos gases traçadores mais utilizados, (Adaptado de [9]).

Gás traçador	Vantagens	Desvantagens
Crípton 85 - ^{85}Kr	Baixa concentração (1 ppm)	Pesado e caro
Óxido nitroso - N_2O	Preço reduzido	Reage com H_2O e CO_2
Hexafluoreto de enxofre - SF_6	Inexistente no ar e seguro	Pesado e caro
Dióxido de carbono - CO_2	Barato e facilmente detetável	Presente no ar

- Exclusividade: numa situação ideal o gás traçador utilizado deverá ser capaz de ser sem influência dos outros componentes presentes no ar. Se for viável deverá ser escolhido um gás que não exista normalmente na atmosfera (ou em muito reduzida concentração).
- Mensurabilidade: deverá ser possível quantificar com a máxima exatidão e precisão possível quer a quantidade quer a concentração do gás traçador escolhido.

Os critérios acima enumerados constituem as características do gás traçador ideal selecionado para a realização dos ensaios experimentais. Contudo, considerações práticas tais como o preço e disponibilidade dos instrumentos de medição acabam por ter um peso maior na hora de decisão do que propriamente os critérios acima mencionados.[3]

Ainda é de referir que, pelo menos até ao presente, não há nenhum gás traçador que cumpra todos os requisitos até agora descritos, pelo que muitos investigadores desta área têm comparado os diferentes gases traçadores na tentativa de descobrir qual se aproxima mais da definição de gás traçador ideal. De seguida apresenta-se a Tabela 2.1 que enumera as vantagens e desvantagens dos gases traçadores mais utilizados.

Como se pode constatar pela Tabela 2.1 uma das desvantagens apontada aos gases traçadores é a elevada densidade dos mesmos. Gases como o ^{85}Kr e SF_6 intitulados como pesados podem ser utilizados nos ensaios dos gases traçadores, contudo, vários cuidados tem de ser tomados para que estes se misturem adequadamente com o ar dentro do espaço do teste. O N_2O é um gás bastante barato, contudo, reage quimicamente com a água e com o dióxido de carbono presentes na atmosfera e ainda tem a desvantagem de ser um gás com um forte efeito de estufa. Principalmente pelas desvantagens dos gases até agora mencionados a escolha na maioria dos casos recai sobre o CO_2 pois dentro de certos limites não representa nenhum risco para os humanos, é barato, acessível, facilmente mensurável e ainda possui um fraco efeito de estufa quando comparado com o N_2O e SF_6 [6].

2.1.2 Conceito de uma zona perfeita

Quando se utiliza o método dos gases traçadores para medir taxas de infiltrações, o conceito de zona é utilizado. Para que os resultados experimentais obtidos sejam válidos, o espaço de teste tem de se aproximar o máximo possível do conceito de "zona perfeita" com as seguintes características [10]:

- Isolamento: um zona perfeita só comunica com o exterior, área cuja concentração de gás traçador não é influenciada pelo contacto com o espaço de teste. Dentro do espaço de teste não deverá haver absorção ou geração de gás traçador pois tal afetaria a veracidade dos resultados obtidos.
- Homogeneidade: A densidade e concentração do gás traçador deverá ser igual em todos os pontos do espaço de teste. Ar exterior que seja introduzido numa zona perfeita dispersa-se instantânea e homogeneamente. Na prática e como se poderá constatar na secção 3.2 algum tempo será necessário para que a homogeneização do espaço de teste seja alcançada. Desde que o tempo de ensaio seja significativamente maior do que o tempo de mistura a assunção de mistura perfeita pode ser feita.

É muito difícil, senão impossível que um espaço de teste cumpra todos estes requisitos de maneira a poder ser considerado uma zona perfeita. Entretanto, o erro mais relevante na determinação da taxa de infiltrações está relacionado com a não-homogeneidade do gás traçador, portanto algumas estratégias devem ser adotadas para que a casa modelo se aproxime o mais possível de uma zona perfeita, como será descrito na secção 3.2.

2.1.3 Equação de conservação de massa

Para compreender como se estima a taxa de infiltrações recorrendo ao método dos gases traçadores é necessário perceber como evolui a concentração de um gás no espaço de teste em regime transitório. Numa primeira fase é pertinente fazer a mesma análise mas para um volume de controlo a trabalhar em regime permanente. Como se pode observar na Figura 2.4 um certo caudal de ar (\dot{V}) com uma concentração de gás (C_a) entra num volume de controlo onde há geração (\dot{G}) e absorção (\dot{E}) do mesmo gás. Em regime permanente, o mesmo caudal (\dot{V}) sai para o exterior mas agora com uma concentração (C_s) de gás. É de salientar que no âmbito da conservação de massa não é relevante qual o gás que escoar no sistema.

Começando por se fazer o balanço mássico de gás no volume de controlo tem-se que:

$$\dot{V}C_a + \dot{G} = \dot{V}C_s + \dot{E} \quad (2.3)$$

Reagrupando a equação 2.3 consegue-se obter a concentração de gás no interior do volume de controlo em função das outras variáveis:

$$C_s = C_a + \frac{\dot{G} - \dot{E}}{\dot{V}} \quad (2.4)$$

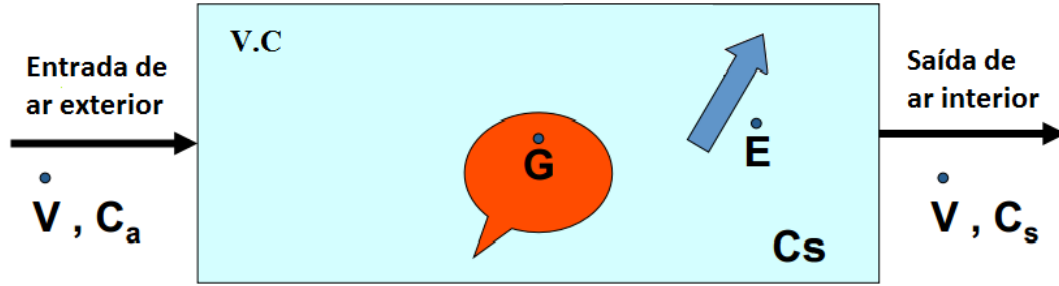


Figura 2.4: Representação esquemática dum volume de controle que troca ar com o meio exterior [5].

No caso de um sistema em regime transiente, existe acumulação de gás no V.C (ver Figura 2.4). Modificando a equação 2.3 para contabilizar esta acumulação de gás obtém-se:

$$V \frac{dC_s}{dt} = \dot{V}C_a + \dot{G} - \dot{E} - \dot{V}C_s \quad (2.5)$$

A equação 2.5 diferencial, ordinária, linear de primeira ordem pode ser integrada analiticamente ou numericamente dependendo das condições iniciais. Assumindo que $\dot{E} = 0$, a equação anterior tem a seguinte solução analítica:

$$C_s(t) = C_a + \frac{\dot{G}}{\dot{V}} + \left[C_s(t_0) - C_a - \frac{\dot{G}}{\dot{V}} \right] e^{-\frac{\dot{V}}{V}(t-t_0)} \quad (2.6)$$

Em que $(C_s(t_0))$ diz respeito à concentração do gás no instante inicial (t_0) . Esta equação é bastante relevante para o método dos gases traçadores pois é graças a esta que é possível determinar a taxa de infiltrações.

2.1.4 Metodologias de ensaio com a tecnologia dos gases traçadores

O método dos gases traçadores pode ser implementado em regime transitório em que os testes laboratoriais são realizados de maneira a que a concentração do gás traçador varie ao longo do tempo, ou em regime permanente em que o objetivo é manter a concentração de gás traçador constante durante o ensaio [11].

Em regime permanente o método de implementação tem a designação de concentração constante, sendo necessário numa fase inicial estabelecer-se uma concentração desejada no interior do espaço de teste. A concentração de equilíbrio escolhida não pode ser muito elevada pois implica grandes custos experimentais e eventuais problemas de saúde, por outro lado, não pode ser muito baixa pois dificulta a deteção do gás traçador. Na Figura 2.5 apresenta-se um gráfico da evolução temporal hipotética da concentração de gás traçador.

Nestes ensaios a variável chave é o caudal de gás traçador injetado no espaço sendo que este varia no tempo. Como se pode constatar pela Figura 2.5 nestes ensaios faz-se uma injeção súbita de gás traçador até atingir o valor da concentração pretendido.

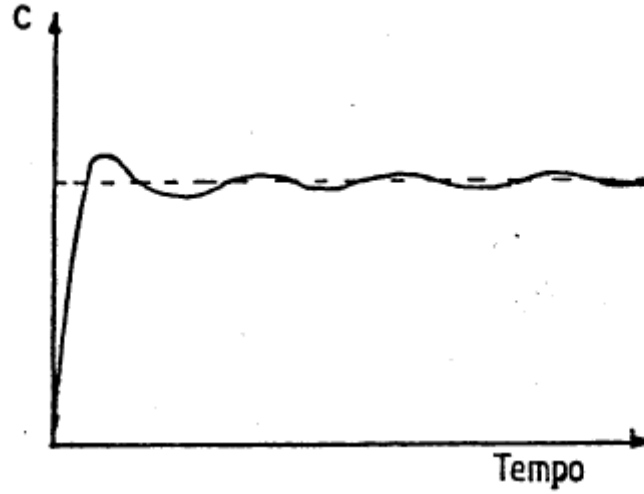


Figura 2.5: Representação da evolução da concentração de gás traçador em regime permanente [3].

No processo de manter a concentração constante e igual à desejada um elaborado sistema de controlo automático de injeção de gás consegue, em cada instante, determinar o caudal de infiltrações no espaço de teste. Este método leva a erros da ordem dos 6 % mas tem como principal inconveniente o custo elevado do equipamento necessário [3].

Tendo sido abordado o método de ensaio mais relevante no domínio permanente, apresenta-se de seguida os modos de implementação do método dos gases traçadores mais difundidos no regime não-permanente.

2.1.4.1 Método de Declive

Este modo de implementação é o mais difundido hoje em dia devido á sua simplicidade e baixo custo. Consiste em introduzir de forma rápida, dentro do espaço de teste, uma certa quantidade de gás traçador até este atingir uma concentração inicial C_0 . Atingida esta concentração cessa-se o fornecimento de gás traçador, começando-se a registar a evolução temporal da sua concentração dentro do espaço de teste [5]. Durante as medições não há injeção de gás traçador ($\dot{G} = 0$) logo a equação 2.6 pode ser escrita da seguinte forma:

$$C(t) = C_a + (C_0 - C_a) \cdot e^{-\frac{\dot{V}}{V} \cdot t} \quad (2.7)$$

De acordo com a equação 2.7 a evolução temporal da concentração de gás evolui segundo uma cinética de primeira ordem como mostra a Figura 2.6. A equação 2.7 pode ser linearizada aplicando logaritmos a ambos os lados e fazendo um pequena substituição $\frac{\dot{V}}{V} = \lambda$ em que λ diz respeito ao numero de renovações de ar por unidade de tempo (normalmente λ vem expresso em (h^{-1})) a evolução da concentração de gás traçador é dada por:

$$\ln [C(t) - C_a] = -\lambda \cdot t + \ln(C_0 - C_a) \quad (2.8)$$

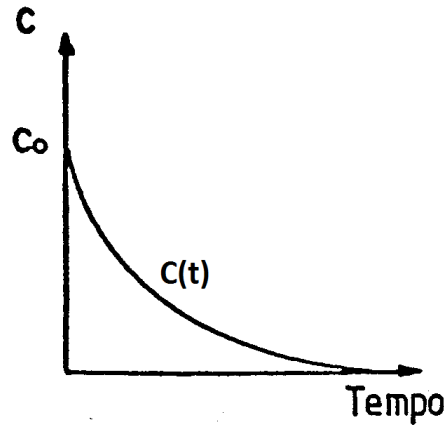


Figura 2.6: Evolução exponencial da concentração de gás traçador segundo o método do declive [3].

Na Figura 2.7 observa-se a evolução temporal da concentração em escala logarítmica segundo a equação 2.8. Através de uma rápida análise da equação 2.8 verifica-se que o declive da reta λ é equivalente ao número de renovações horárias de ar dentro do espaço de teste.

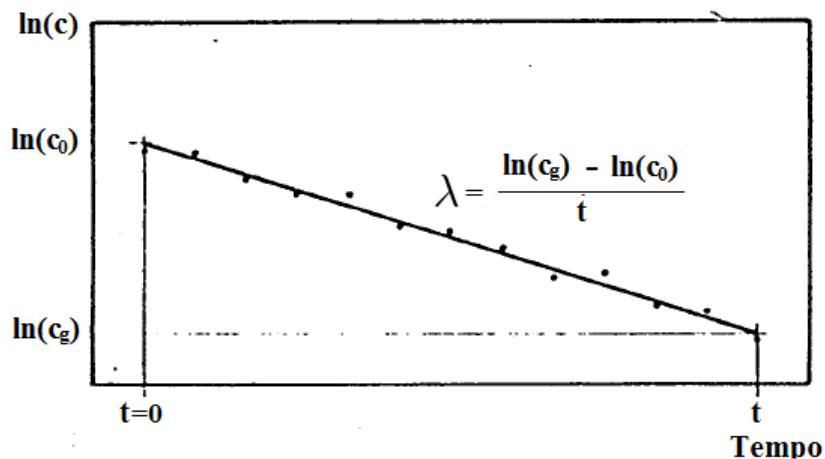


Figura 2.7: Evolução linear da concentração de gás traçador segundo o método do declive [3].

A razão pela qual se fazem várias medições da concentração ao longo do tempo deve-se ao facto de só assim ser possível estimar o erro na determinação da taxa de infiltrações. Se fossem utilizados apenas dois valores da concentração seria impossível estimar qual o erro cometido na determinação de λ (caso da Figura 2.7). Depois de se recolher os dados experimentais existem ferramentas estatísticas (discutidas na secção 3.2) que permitem verificar a validade do modelo linear.

O inconveniente do método do declive reside no facto de não poder ser utilizado para medições com grande duração pois para o fazer seria necessário injetar um grande quantidade de gás traçador podendo provocar problemas sérios de saúde e levar a grandes custos experimentais.

2.1.4.2 Método de caudal constante de gás traçador

Ao contrário do método de declive este método de ensaio é válido para casos em regime permanente e não-permanente. Na realidade, com uma injeção de gás traçador com caudal constante pode-se estimar as infiltrações para os dois regimes apresentando esta metodologia de ensaio duas variantes.

Na variante habitualmente designada como "fonte", o objetivo é determinar o valor pontual das infiltrações presentes introduzindo-se gás traçador no espaço a testar registando-se a sua evolução ao longo do tempo. A concentração inicial do gás é nula e o caudal de injeção é constante (ver Figura 2.8) [1].

Na outra variante deste método o objetivo é estudar a taxa de infiltrações ao longo do tempo fixando-se um caudal de gás traçador a injetar no espaço ficando a sua concentração como variável dependente. Analisando a equação 2.6 e sabendo que durante este ensaio as variáveis \dot{G} , C_a e V são constantes no tempo conclui-se que C_s é apenas função de \dot{V} , ou seja, da taxa de infiltrações. \dot{G} tem de ser escolhido para detetar C_s com a precisão desejada. Este ensaio só tem início depois de dentro do espaço de teste a concentração de gás traçador atingir um nível de equilíbrio C_e . Consoante a presença ou não de infiltrações haverá ou não uma consequente alteração da concentração de gás traçador e a partir daí é possível determinar a taxa de infiltrações no espaço de teste [1].

Muitas vezes realiza-se estas duas variantes de ensaio uma a seguir á outra como se pode constatar pela Figura 2.8. No intervalo de tempo que decorre até a linha tracejado realiza-se a variante da "fonte" e daí por adiante determina-se a taxa de infiltrações ao longo do tempo [9].

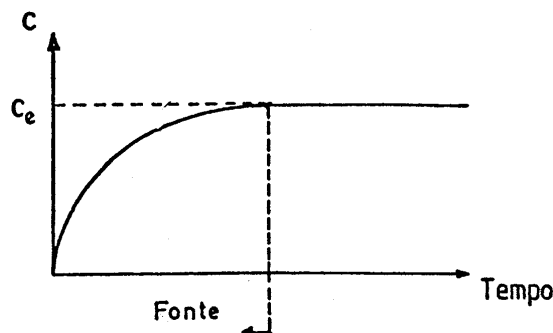


Figura 2.8: Representação da evolução temporal da concentração de gás traçador através do método da injeção de gás traçador constante [3].

De um modo geral pode afirmar-se que a injeção constante de gás traçador é mais apropriada para espaços com altas taxas de ventilação/infiltrações nos quais o gás traçador seja rapidamente "removido" ou em casos em que se tenha uma noção prévia da taxa de infiltrações presente. Nestes espaços se o método do declive fosse implementado iria ser necessário utilizar-se intervalos de medição demasiado pequenos para os aparelhos normalmente utilizados neste método [3].

2.1.4.3 Método de Pulso

O método do pulso é uma variante do método do declive. Contudo, neste tipo de ensaio o volume total de gás traçador injetado é conhecido. A medição da concentração de gás traçador começa antes de este ser injetado no espaço de teste. Outro aspeto importante a ter em conta é que a concentração de gás traçador no espaço de teste deverá ser nula antes de iniciarem os testes laboratoriais. Após a injeção, monitoriza-se a evolução temporal da concentração do gás traçador escolhido [3]. A determinação da taxa de infiltrações é feita recorrendo às equações 2.7 e 2.8 expostas na secção 2.1.4.1. A evolução temporal idealizada da concentração de gás traçador com o método de pulso é apresentada na Figura 2.9.

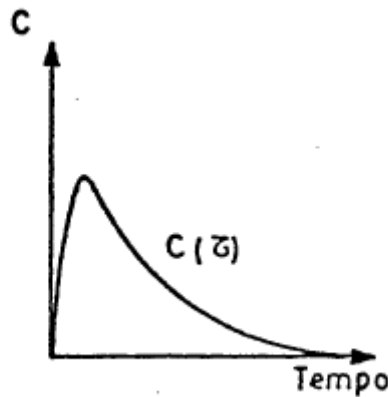


Figura 2.9: Representação da evolução da concentração de gás traçador em regime transitório [3].

Esta metodologia de ensaio partilha as vantagens e inconvenientes do método do declive sendo implementada em casos particulares em que haja a possibilidade da concentração de gás traçador ser fortemente afetada por fatores internos ao espaço de teste [12].

2.2 Porta ventiladora

O método da pressurização, também conhecido como porta ventiladora, não mede diretamente a taxa de infiltrações de um determinado edifício/espço como os métodos da secção 2.1.4. Através da implementação deste método, mede-se a área total de frinchas e indicadores descritos na secção 2.2.3 que permitem fazer uma comparação entre edifícios no que toca à sua maior ou menor facilidade de trocar fluxos de ar com o exterior [1]. Numa fase posterior pode-se, através destes indicadores, fazer uma estimativa dos valores médios da taxa de infiltração sazonal num edifício segundo as correlações apropriadas obtidas experimentalmente. Na presente secção faz-se uma descrição detalhada de todos os conceitos teóricos subjacentes à realização dum ensaio com a porta ventiladora.

2.2.1 Estanquidade ao ar

A maior ou menor facilidade com que a envolvente de um determinado edifício troca ar com o exterior é nada mais nada menos que a definição de estanquidade ao ar [2]. É importante perceber a diferença entre este conceito e a infiltração. Enquanto que a estanquidade ao ar de um edifício é sempre igual, mesmo para diferentes instantes, a taxa de infiltrações do mesmo evolui continuamente ao longo do dia como foi explicado na secção 1.3. Outro conceito relacionado com a estanquidade é a permeabilidade ao ar de um edifício sendo esta expressa em termos de infiltração de ar [m^3/h] por metro quadrado da área da envolvente do edifício, quando submetido a um diferencial de pressão de 50 Pa [3].

Para a implementação do ensaio da porta ventiladora é imprescindível perceber quais os percursos pelos quais o ar pode circular. Estes percursos são esquematizados na Figura 2.11. Esta figura além de fornecer uma ideia geral dos principais fluxos de ar também permite verificar quais os elementos dum edifício que contribuem para existência de infiltrações de ar. De acordo com [13] o contributo de cada elemento no total de infiltrações num edifício com sistema AVAC é apresentado na Figura 2.10.

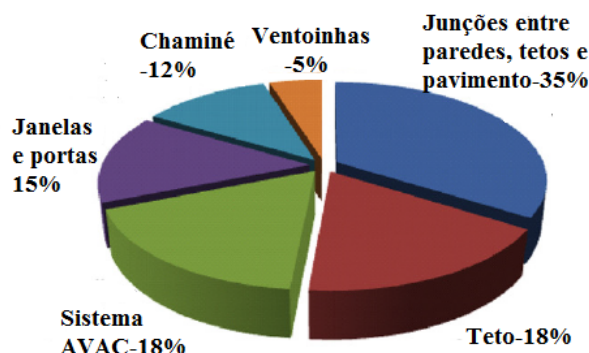


Figura 2.10: Contributo dos diferentes elementos construtivos nas infiltrações de ar, (Adaptado de [13]).

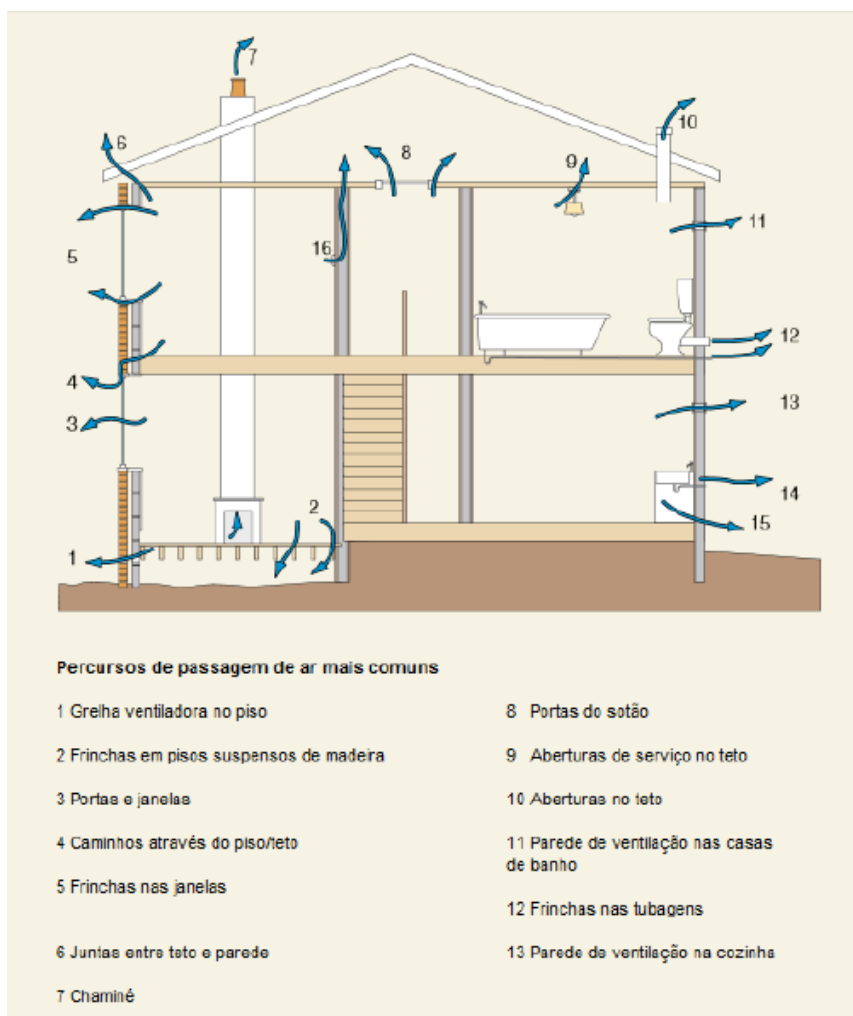


Figura 2.11: Principais percursos de passagem de ar [11].

Como se pode constatar pela Figura 2.10, as portas e as janelas possuem uma contribuição para a existência de infiltrações de apenas 15% enquanto que as junções das paredes com o chão e o teto possuem uma contribuição de 35% (a maior de todas) o que pode ser explicado devido à grande área de junções deste tipo presentes numa habitação.

Para alcançar uma boa estanquidade ao ar é então necessário uma camada contínua resistente ao ar em toda a envolvente do edifício incluindo piso térreo, paredes exteriores e ainda o teto [11]. Muitos investigadores estudam hoje em dia estratégias e soluções construtivas que visam alcançar uma boa estanquidade ao ar. Estas devem implementadas em espaços suficientemente ventilados como já foi explicado na secção 1.2.

2.2.2 Ensaio com a porta ventiladora

A porta ventiladora é um equipamento utilizado para pressurizar ou despressurizar um edifício com o objetivo de determinar a estanquidade da envolvente e identificar as causas e locais de fuga de ar [5]. Este equipamento não é mais do que uma porta de dimensões variáveis provida de um ventilador como se pode ver na Figura 2.12. As curvas características do ventilador (\dot{V} , ΔP) têm de ser previamente conhecidas por forma a conhecer em cada regime de funcionamento o caudal de ar debitado.

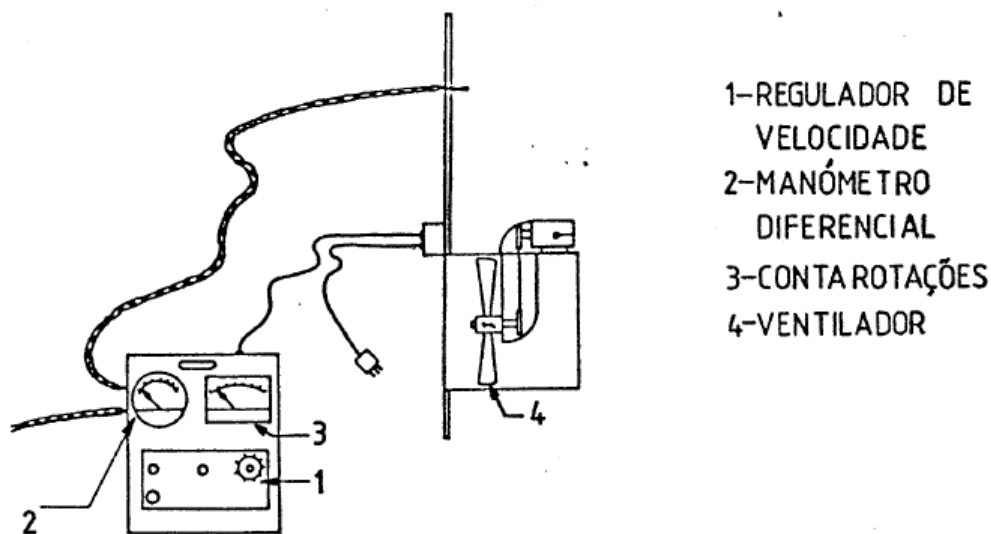


Figura 2.12: Esquema de princípio da porta ventiladora [3].

Como se pode verificar pela Figura 2.12 o equipamento utilizado para realizar o ensaio de pressurização, é constituído por quatro componentes principais:

- Um ventilador de velocidade variável (4), com a capacidade de induzir uma variedade de caudais de ar suficiente para pressurizar e despressurizar edifícios de diferentes volumes;
- Um manómetro diferencial (2), para medir a pressão diferencial induzida entre a montante e a jusante do ventilador;
- Um controlador de velocidade do ventilador (1) e um sistema de montagem, semelhante a uma moldura (não esquematizada na Figura 2.12) que deve ser instalado numa porta do edifício com ligação para o exterior, usualmente na porta principal;
- Conta rotações (3) que permite saber a cada instante a velocidade de rotação do ventilador.

Os ensaios com a porta ventiladora consistem em substituir uma das portas ou janelas por este equipamento. O ventilador quando em funcionamento cria um diferencial de pressões de pressões negativo ou positivo entre o interior e o exterior do edifício, consoante esteja a ser pressurizado ou despressurizado. Para cada diferença de pressão regista-se o caudal de ar movimentado. Com a análise da curva característica do ventilador obtém-se gráficos como o da Figura 2.13.

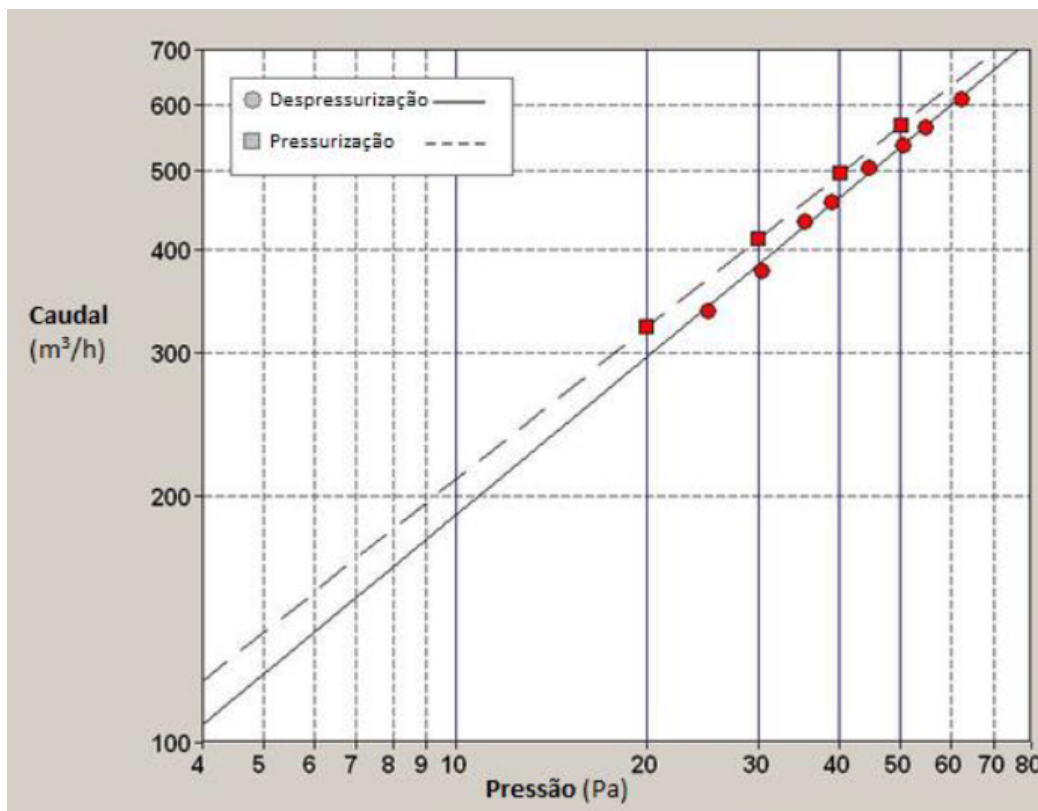


Figura 2.13: Exemplo de curvas de pressurização e despressurização [11].

Após de obter as curvas representadas na Figura 2.13, ajustas-se aos dados de pressurização e despressurização segundo a seguinte equação:

$$\dot{V}_{corr} = K \cdot (\Delta P)^n \quad (2.9)$$

Nesta equação, o coeficiente de escoamento (K) está relacionado com a dimensão e forma das frinchas do edifício a testar e o expoente (n) toma valores entre 0,5 a 1 consoante o escoamento seja laminar ou turbulento. Na prática (n) toma o valor intermédio 0,65 uma vez que este expoente, dando um informação integrada do escoamento representa uma média pesada dos dois valores anteriormente mencionados.[3]

Como é natural, o comportamento de um edifício é diferente sob condições de pressurização ou de despressurização, conseqüentemente, as curvas características na Figura 2.13 tipicamente não são coincidentes. A explicação de tal fenómeno prende-se com o facto das diversas juntas constituintes dos edifícios comportarem-se como válvulas unidireccionais consoante a pressurização ou despressurização dos mesmos

[5]. Como exemplo pode-se referir o vedante utilizado nas caixilharias de alumínio dos vãos envidraçados presentes na maioria das habitações em Portugal. Estes vedantes fecham-se quando sujeitos à pressurização e abrem-se quando sujeitos à depressurização.

Apesar do ΔP entre o interior exterior verificado na maioria dos edifícios ser da gamas dos $\pm 10 \text{ Pa}$ os testes realizados com a porta ventiladora utilizam um ΔP dos 4 aos 80 Pa como se pode constatar pela Figura 2.13. Tal deve-se essencialmente a dois motivos [3]:

- Para $\Delta P < 10 \text{ Pa}$ os erros na medição são bastante relevantes o que pode levar a resultados com uma reduzida margem de confiança.
- Se fossem utilizados diferenciais de pressão na gama dos 10 Pa não se poderia quantificar a contribuição do ventilador nos resultados obtidos pois nessa gama de valores as infiltrações iriam acabar por "dominar" o escoamento promovido pela porta ventiladora.

Outro aspeto importante durante a realização dos ensaios com a porta ventiladora é a variação da pressão atmosférica e temperatura ambiente entre o momento de calibração do ventilador e o momento da execução do ensaio. Usualmente a diferença de temperaturas tem uma maior influencia na correção do caudal medido, comparado com a mudança de pressão atmosférica. A correção do valor medido é feita recorrendo à seguinte equação:[3]

$$\dot{V}_{corr} = \dot{V}_{med} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{int}} \cdot \frac{P_{ext}}{101,325} \cdot \frac{25}{T_{ext}}} \quad (2.10)$$

Na equação 2.10 as variáveis \dot{V}_{corr} e \dot{V}_{med} dizem respeito ao caudal volúmico de ar real e em condições de calibração medido pelo aparelho, respetivamente. T_0 trata-se da temperatura durante a calibração do ventilador, enquanto que T_{int} se refere à temperatura exterior do local de ensaio. As temperaturas devem ser substituídos na equação 2.10 em $^{\circ}C$. Para obter o caudal corrigido ainda é necessário medir a pressão atmosférica na altura do ensaio (P_{ext}) expressa em kPa e a temperatura do ar exterior (T_{ext}) ao local de ensaio.

Podem-se destacar duas particularidades do método da porta ventiladora. A primeira prende-se com o facto de ser possível testar elementos individuais da estrutura tais como portas, janelas e caixas de estore sendo o processo de implementação idêntico ao descrito acima. A segunda particularidade dos ensaios com a porta ventiladora é que o mesmo pode ser complementados com o recuso á libertação de fumos junto a potenciais locais de infiltração durante a realização dos ensaios permitindo assim a deteção de frinchas [1].

2.2.3 Indicadores obtidos pelos ensaios

A partir dos resultados obtidos com a porta ventiladora além da medição da área de frinchas, é ainda possível determinar outros indicadores do comportamento do edifício relativamente às infiltrações. Estes indicadores são descritos nas secções 2.2.3.1 e 2.2.3.2 e sua determinação é feita com o intuito de fazer comparações entre edifícios e ainda em alguns países servem para se realizar verificações regulamentares (secção 2.2.5) [11].

2.2.3.1 Área efetiva de frinchas (ELA)

A determinação da área efetiva de frinchas (*Effective Leakage Area* - ELA) é feita com o objetivo de ser possível comparar edifícios entre si no que toca à área de frinchas. Este indicador permite também, como será demonstrado na secção 2.2.4, fazer uma estimativa do nível médio de infiltrações presente no espaço de teste. A ELA pode ser definida de duas maneiras: do ponto de vista conceptual representa o total de área da envolvente dum edifício que troca ar com o exterior, do ponto de vista matemático/físico este indicador pode ser interpretado como a área de um difusor que, para um dado ΔP deixaria escoar o mesmo caudal de ar que o edifício em causa [3].

Pela aplicação da equação de Bernoulli a um difusor genérico tem-se que:

$$\Delta P = \rho \cdot \frac{U_m^2}{2} \quad (2.11)$$

Na equação 2.11 U_m é a velocidade média do escoamento dentro do difusor. Resolvendo a equação anterior em ordem a U_m obtém-se:

$$U_m = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.12)$$

Como o caudal volúmico que atravessa uma frincha é inferior ao que passa por um difusor (devido ao efeito da perda de carga localizada), a velocidade média tem de ser corrigida pelo coeficiente de descarga (C_d):

$$U_{mf} = C_d \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2.13)$$

Na equação 2.13 U_{mf} é a velocidade média do escoamento que atravessa uma frincha. Aplicando o conceito de conservação de massa e assumindo que a massa volúmica (ρ) do ar é constante, o caudal volúmico de ar que atravessa uma frincha pode ser determinado por:

$$\dot{V} = C_d \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \cdot ELA \quad (2.14)$$

Onde ELA é a área efetiva de frinchas que se pretende determinar. Substituindo \dot{V} pela equação 2.9 pode-se escrever que:

$$ELA = \frac{K}{C_d \sqrt{2}} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta P^{(n-1/2)} \quad (2.15)$$

Como se consegue constatar pela última equação a ELA frinchas não é independente do diferencial de pressões adotado como é possível verificar pela Figura 2.14.

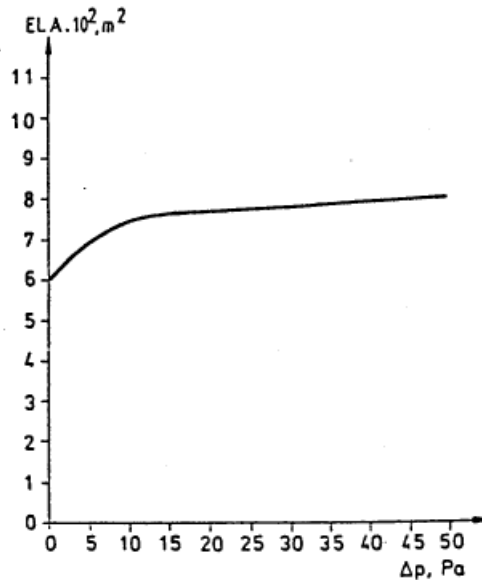


Figura 2.14: Variação de ELA com o ΔP adotado [3].

Tendo por base a equação 2.15 pode-se então estabelecer duas variantes para este indicador [3]:

- Considera-se que o difusor é perfeito ($C_d = 1$) e que o caudal é obtido para um $\Delta P = 4 \text{ Pa}$.
- Por hipótese admite-se que $C_d = 0,611$ e que o caudal é obtido para $\Delta P = 10 \text{ Pa}$. Nesta situação este indicador é habitualmente designado por Área Total Equivalente de Frinchas.

Apesar das duas variantes anteriormente descritas usarem valores de referencia diferentes em termos de significado físico são idênticas e não há nenhuma vantagem da utilização de uma em relação a outra sendo que a escolha entre uma delas é feita tendo em conta os equipamentos de medição disponíveis [3].

É importante referir que este indicador, tal como foi apresentado nesta secção, não pode constituir elemento de comparação absoluto entre edifícios, pois apesar de um dado edifício ter uma ELA maior do que outro não implica necessariamente a envolvente apresente infiltrações superiores ao edifício com a ELA menor [14]. Assim foi proposto que a área total de frinchas fosse normalizada pela área total da envolvente do edifício obtendo-se assim um indicador adimensional que permite fazer comparações mais objetivas entre edifícios[13].

2.2.3.2 N° de renovações horárias com $\Delta P = 50 \text{ Pa}$ (I_{50})

O significado do indicador I_{50} é o numero de renovações horárias de ar a um $\Delta P = 50 \text{ Pa}$. Este numero é utilizado com o objetivo de comparar edifícios no que toca ao caudal de ar trocado através das respetivas envolventes e com a sua utilização, normaliza-se o ΔP induzido pelo ventilador utilizado nos ensaios com a porta ventiladora [11].

Como se verificará mais adiante, o I_{50} é muito utilizado como termo de comparação nos países do norte da Europa. Ao longos dos anos surgiram algumas propostas para alterar a pressão de referência para 25 Pa com o argumento de que esta pressão se encontra mais próxima da pressão que surgiria naturalmente com o aparecimento das infiltrações, contudo, esta proposta nunca ganhou muitos adeptos devido aos erros de medição que surgem quando se utilizam pressões desta ordem e grandeza [3].

Tal como se foi explicado na secção anterior este indicador só por si não pode constituir um termo de comparação absoluta entre edifícios sendo então necessário dividir este valor pela área total da envolvente do edificio em estudo.

2.2.4 Previsão do nível médio das infiltrações com o método da porta ventiladora

Antes de se passar para a estimativa do nível médio das infiltrações é imprescindível perceber como os indicadores ELA e I_{50} variam ao longo do ano. A determinação do I_{50} simula uma situação notoriamente artificial, pois para se verificar $\Delta P = 50 \text{ Pa}$ o edifício/espaço em estudo teria forçosamente de estar sujeito á incidência de vento forte (na ordem dos 10 m/s) sobre todas as fachadas expostas. Ou seja, sempre que se terminar I_{50} admitem-se constantes as condições exteriores e interiores, independentemente da época do ano em que se realizam os ensaios [11]. Estudos feitos em vários países com diferentes condições climáticas diversas demonstram que o I_{50} varia sazonalmente devido ás variações das características estruturais dos edificios que afetam em larga escala a sua estanquidade ao ar [3]. Pode-se portanto afirmar que os indicadores ELA e o I_{50} variam sazonalmente não se sabendo qual o sentido da sua variação. Tal deve-se á influencia exercida pela temperatura e humidade relativa do ar dentro de cada edificio que alteram a área das frinchas.

Uma vez que os ensaios pela porta ventiladora são relativamente simples os investigadores procuram correlacionar os resultados obtidos por este teste com o nível médio anual das infiltrações. Uma das primeiras propostas para definir correlação veio por parte de Sherman [3] tendo este proposto que o nível médio de infiltrações de uma habitação é dado por:

$$I = \frac{I_{50}}{N} \quad (2.16)$$

Em que a variável (N) é uma função de vários fatores como:

- Soluções construtivas adotadas no edifício em estudo.
- Classe de exposição ao vento.
- Condições climáticas médias da região onde o edifício se insere.

É bastante complexo definir um valor N sendo que há algumas normas e diretrizes que aconselham qual o valor de N a utilizar em cada situação que serão descritas na secção 3.3.

2.2.5 Normas

Uma vez que os resultados dependem fortemente das condições em que os testes são realizados, existe uma necessidade de elaborar normas para que os indicadores obtidos possam ser utilizados para comparar edifícios entre si.

Como já foi mencionado na secção 1.1 os primeiros a debruçarem-se sobre a temática das infiltrações foram alguns países da Europa do norte (Suécia e Noruega), Canadá e E.U.A tendo sido também estes países os primeiros a definir normas reguladoras para a implementação do ensaio da porta ventiladora. Surgiram então as normas na Suécia (SIS 021551) , Noruega (NOR 1981), Estados Unidos (ASTM 1981) e Canadá (CGSB 1985) mostrando-se na Tabela 2.2 as exigências de cada uma:

Tabela 2.2: Normas para ensaio de pressurização, (Adaptado de [3]).

Países	Indicador	Vel. máx. vento para realização dos ensaios (m/s)	Correções		Volume do edifício	Vent. Mecânica
			$ \Delta T $	$ \Delta P $		
Suécia	I_{50}	6	Sim	Não	Aquecido	Selada
Noruega	I_{50}	6	Sim	Não	Aquecido	Selada
E.U.A	ELA (4 Pa.)	4,5	Sim	Sim	Aquecido	Normal
Canadá	ELA (10 Pa.)	5,5	Sim	Sim	Total	Selada

Analisando a Tabela 2.2 pode-se concluir que resultados obtidos em ensaios de pressurização em diferentes países não podem ser comparadas diretamente entre si, devido às diferenças existentes nas normas aplicadas em cada país. As normas adotadas divergem tanto no indicador utilizado tanto nas condições de ensaio em que estes indicadores são obtidos. Mesmo em casos em que o indicador utilizado é o mesmo (E.U.A e Canadá), as diferenças nas condições de ensaio levam a que não se possa fazer uma comparação entre edifícios destes dois países.

Países como a Suécia e Noruega, preocupados com o consumo energético dos seus edifícios, definiram valores limites para o I_{50} , tendo em conta, os diferentes tipos de habitação existentes. Estes valores limites estão resumidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Valores máximos de I_{50} , (Adaptado de [3])

Tipo de habitação	I_{50}	
	Suécia	Noruega
Edifício com mais de 2 andares	1	1,5
Edifício com 2 andares	2	3
Vivendas	3	4

É importante referir que ainda existe um conjunto de normas, técnicas e exigências a cumprir a nível de equipamentos de teste utilizados, sendo estas explicitadas na secção 3.3.

2.2.6 Limitações e conclusões sobre o método da porta ventiladora

A principal limitação da porta ventiladora encontra-se associada à determinação da taxa de infiltrações num edifício com diversas zonas que trocam ar entre si [3]. Por exemplo, num prédio com vários apartamentos os resultados obtidos pela porta ventiladora para um apartamento são influenciados por fluxos de ar entre apartamentos, afetando a validade dos valores obtidos. Contudo, esta limitação pode ser ultrapassada implementando uma porta ventiladora nos apartamentos em contacto com o espaço de teste, havendo desta maneira, uma equalização das pressões em todos deles [11].

Apesar desta limitação o método da pressurização continua ser um meio bastante valioso no que toca ao estudo das infiltrações nos edifícios. É um método bastante simples requer equipamento de baixo custo, pouco complexo e fácil de transportar. Finalmente ainda tem como vantagem o facto dos ensaios deste método durarem pouco mais do que 30 min.

2.3 Comparação dos métodos experimentais enunciados

Os dois métodos descritos nas secções 2.1 e 2.2 e ainda o método do comprimento total das frinchas (mencionado no início do presente capítulo) são utilizados para o mesmo fim: caracterizar um edifício sob o ponto de vista das infiltrações [7]. Qualquer dos métodos anteriormente mencionados é incompleto e a caracterização completa dos fluxos de ar trocados por um edifício passa pela determinação de vários parâmetros e nenhum destes métodos permite a medição ou estimativa de todos. Na Tabela 2.4 indicam-se os parâmetros que é necessário medir e quais os métodos que podem ser utilizados para tal fim.

Tabela 2.4: Comparação dos métodos existentes para a determinação de características de edifícios, (Adaptado de [3]).

Características Métodos		Infiltrações	Caudais entre zonas	Localização das frinchas	Área das frinchas
Cálculo	Comprimento total das frinchas	Sim	Não	Não	Não
Medição	Porta Ventiladora	Sim	Não	Com recurso a fumos	Sim
	Gases traçadores	Sim	Sim	Não	Através de correlações

A principal conclusão a retirar da Tabela 2.4 é que os vários métodos se complementam entre si, e para que se faça uma caracterização completa de um edifício deve proceder-se á implementação dos métodos anteriormente mencionados.

Capítulo 3

Metodologia Experimental

No início do capítulo 2 foram apresentados os dois mecanismos responsáveis pela troca de fluxos de ar de um edifício com o exterior. Posteriormente, foi feita uma descrição dos fundamentos teóricos relativos aos dois métodos utilizados para determinação da taxa de infiltrações na casa modelo: gases traçadores e porta ventiladora. No presente capítulo começa-se por fazer uma descrição da casa modelo (seção 3.1) sendo que nas secções 3.2 e 3.3 explicam-se todos os procedimentos experimentais adotados para a implementação dos ensaios anteriormente mencionados.

3.1 Descrição da casa modelo

A construção da casa modelo, alvo de estudo nesta dissertação, tem como principal objetivo desenvolver um espaço de demonstração da tecnologia de arrefecimento e aquecimento de energia solar. A climatização da casa modelo envolve a interação de 3 subsistemas [15]:

- **Subsistema solar** - Responsável pelo aquecimento e fornecimento de energia térmica para arrefecimento.
- **Subsistema de refrigeração** - Responsável pelo arrefecimento (ciclo injetor).
- **Subsistema de aquecimento/arrefecimento** - Espaço e equipamento de climatização (casa modelo).

Na Figura 3.1 apresenta-se um esquema que identifica os subsistemas anteriormente mencionados e a interação entre eles. No âmbito da presente dissertação não é relevante detalhar todos os equipamentos utilizados nos diferentes subsistemas, sendo que estes se encontram instalados numa casa das máquinas (20) anexada à casa modelo (ver Figura 3.6). Para facilitar futuras referências da instalação, denominou-se o projeto por SOLAC-TDF (*SOLar Air Conditionated - Test and Demonstration Facility*), sendo a casa modelo denominada apenas por TDF.

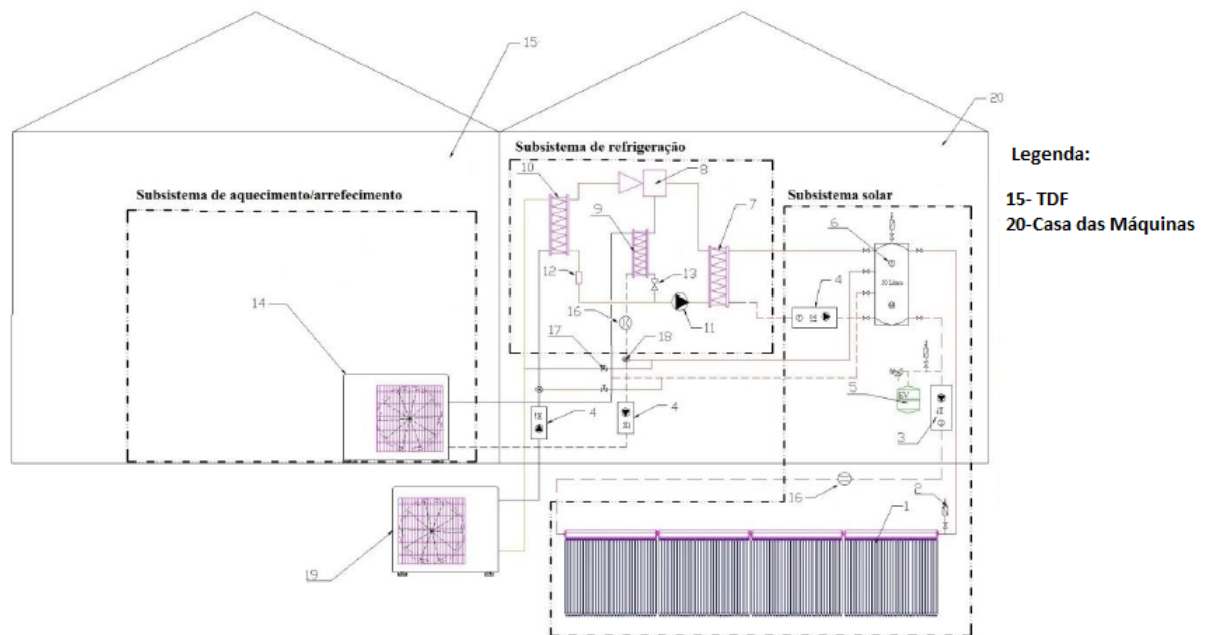


Figura 3.1: Desenho esquemático do sistema SOLAC-TDF, (Adaptado de [15]).

A sala de maquinas, vista na Figura 3.2 com todas as características geométricas, tem como área útil 4 m^2 e é equipada com uma porta na fachada Sul. A TDF, representada na Figura 3.3 com as respectivas características geométricas, tem uma área útil de 15 m^2 e um pé-direito de 2,50 m. A parede orientada a Sul possui uma janela e uma porta. Este é o compartimento da instalação a ser aquecido e arrefecido a partir de energia solar e no qual se determinou da taxa de infiltrações com os dois métodos estudados.

O local escolhido para a instalação da TDF e casa de maquinas foi a cobertura exterior do edifício L da FEUP. A nivelção da instalação é feita com vigas metálicas apoiadas sobre blocos quadrangulares de cimento como se pode ver na Figura 3.4. Tanto a TDF como a casa das máquinas foram posicionadas perto da casa do elevador para permitir a proximidade ao quadro elétrico e ao mesmo tempo garantir espaço para circular por trás da instalação como se pode verificar na Figura 3.5. Devido a um regime de ventos mais forte na cobertura quando comparado com o nível do chão, especialmente na altura do Inverno e da construção leve, foram utilizadas três cabos de aço para a TDF um para a casa das máquinas, de modo a fixar estes espaços como se pode verificar na Figura 3.6.

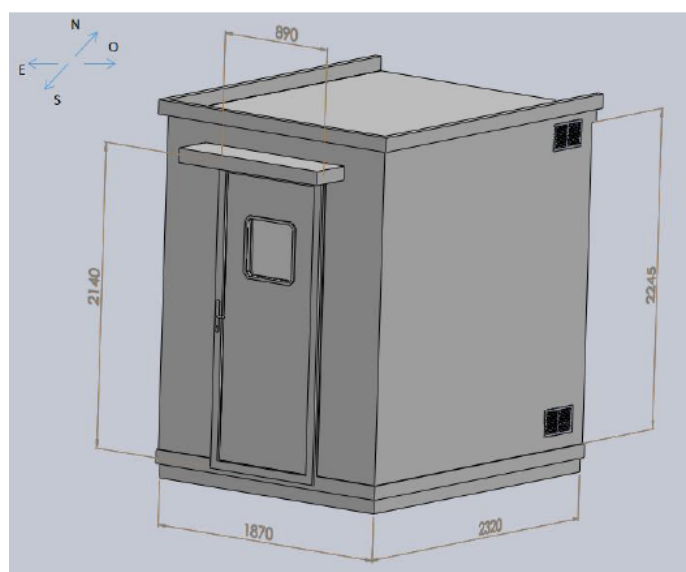


Figura 3.2: Desenho tridimensional da casa das máquinas com as dimensões mais relevantes [15].

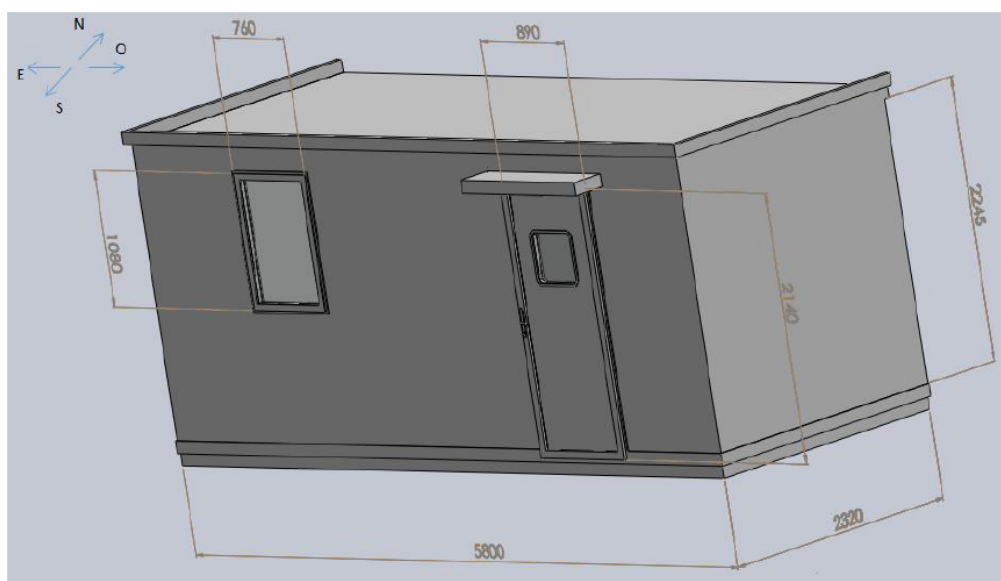


Figura 3.3: Desenho tridimensional da TDF com as suas principais dimensões [15].

É também relevante considerar as soluções e materiais de construção utilizados na TDF uma vez que podem contribuir para a quantidade de infiltrações. A conceção, construção e implementação da casa modelo ficou encarregue à empresa n2build [16]. Esta empresa tem como atividade o design, desenvolvimento, fabrico e implementação de edifícios comerciais e de habitação constituídos por um material construtivo denominado *Composite Structural Insulated Panels* (CSIP's). Estes painéis são unidos entre si através de resinas e adesivos estruturais sendo que suas propriedades e a dos diferentes constituintes dos painéis CPIPs podem ser consultadas no Anexo A.

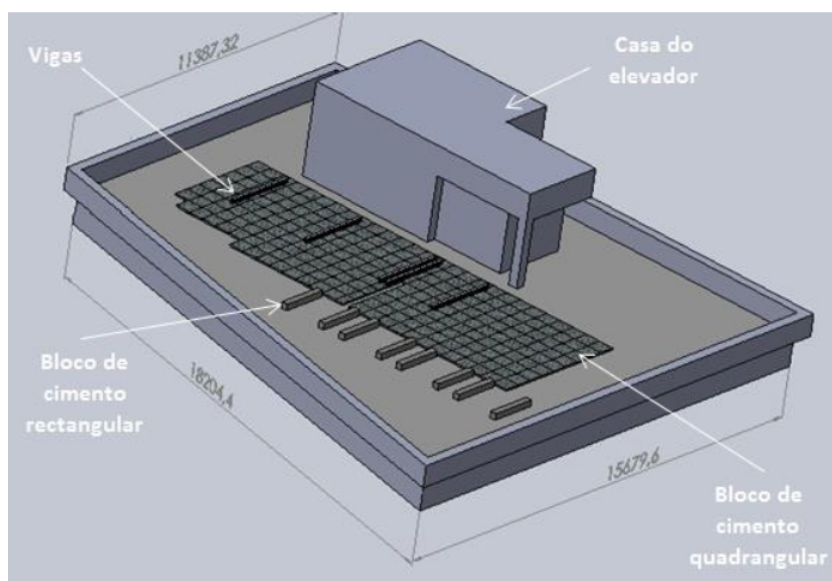


Figura 3.4: Desenho tridimensional da cobertura exterior do edificio L da FEUP.[15]

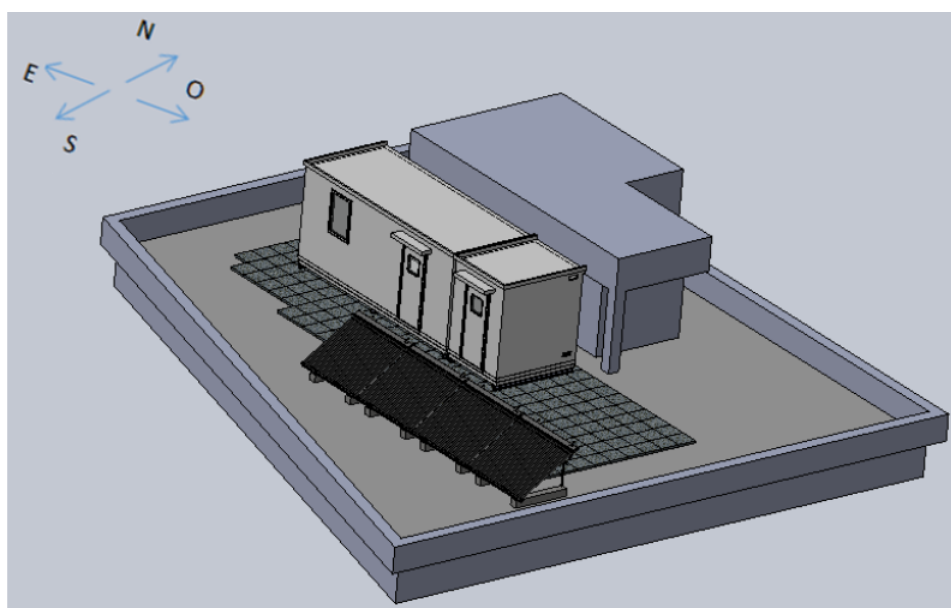


Figura 3.5: Desenho tridimensional da cobertura depois da colação dos compartimentos e equipamentos [15].

Como foi explicado na secção 2.2.1 as junções parede com parede e parede com cobertura e possuem uma contribuição de 35% (a maior de todas) na carga térmica de infiltrações sendo então relevante estudar como são constituídas este tipo de junções na TDF. Um esquema das duas ligações em questão: cobertura-parede e parede-parede é apresentado na Figura 3.7. Na Figura 3.8 pode observar-se uma fotografia das duas junções presentes na TDF.

Como todas as junções cobertura-parede e parede-parede estão unidas através da mistura resina e adesivos estruturais, é de esperar que este elemento estrutural não contribua significativamente para a existência de infiltrações na casa modelo. Os outros elementos construtivos que podem contribuir para existência de infiltrações na TDF são a janela e a porta sendo que estes possuem vedação mecânica.



Figura 3.6: TDF e casa das máquinas fixadas com cabos de aço [15].

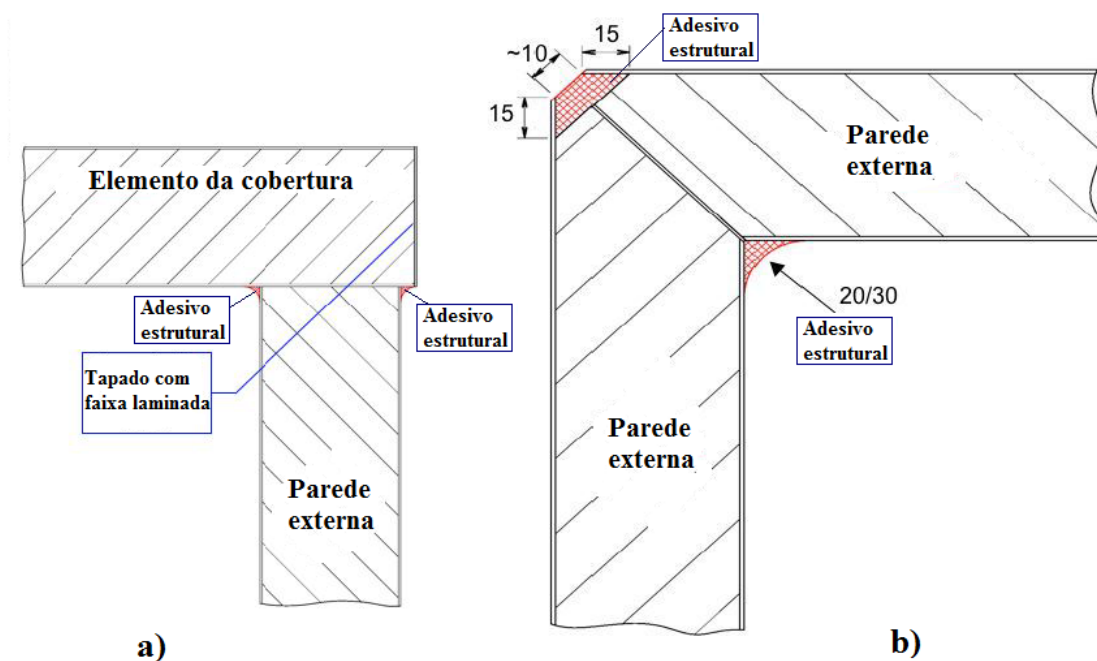


Figura 3.7: Representação esquemática da ligação cobertura-parede (a) e da ligação parede-parede (b), (Adaptado de [16]).

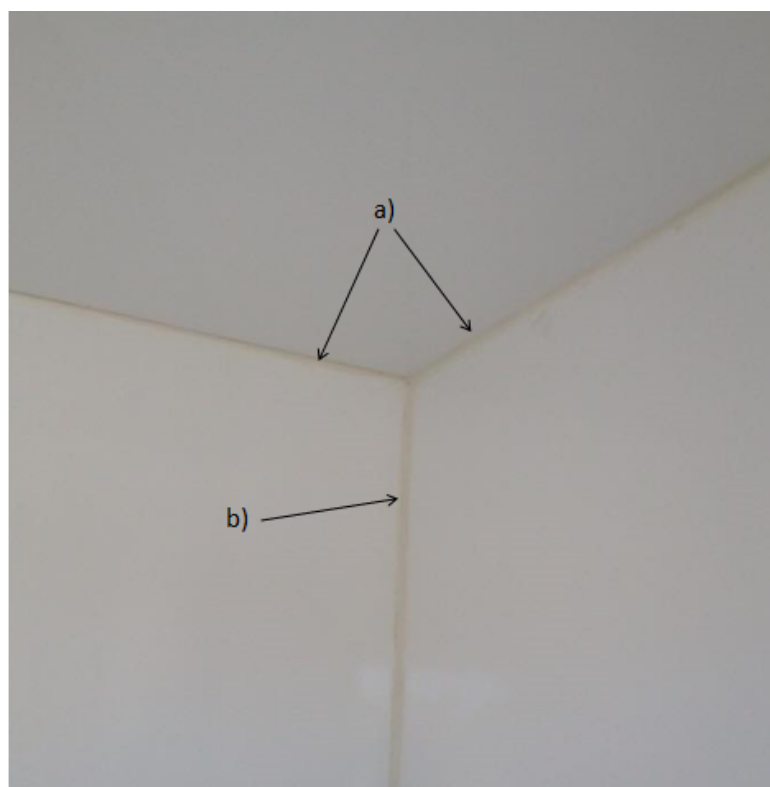


Figura 3.8: Fotografia da junção cobertura-parede (a) e junção parede-parede (b).

3.2 Método dos gases traçadores

Na secção 2.1.4 foram descritas as principais metodologias para a implementação do ensaio dos gases traçadores com as vantagens e desvantagens inerentes a cada uma delas. Em função do equipamento disponível seleccionou-se o método do declive para o estudo da taxa de infiltrações através do ensaio dos gases traçadores. Nas seguintes secções serão descritos todos os procedimentos experimentais e detalhes técnicos relevantes para a implementação deste tipo de ensaio na TDF.

3.2.1 Normalização

Existe apenas uma norma [10] que indica as linhas gerais da medição das infiltrações em edifícios através do método dos gases traçadores. O conteúdo desta norma já foi parcialmente referido na secção 2.1, e aponta para os seguintes aspetos [10]:

- Equipamento: devem ser colocadas ventoinhas oscilantes dentro do espaço de teste, de modo a melhor dispersar o gás traçador utilizado e garantir que o espaço em questão se comporta o mais próximo de uma zona perfeita. Deve-se ter o cuidado de verificar se no espaço de teste está presente algum equipamento que absorva ou liberte o gás traçador utilizado.
- Segurança: a norma estabelece a concentração máxima dos gases traçadores mais utilizados. Para o CO_2 é estabelecido uma concentração máxima de 5000 ppm, contudo indica que para salvaguardar a saúde de quem faz os ensaios laboratoriais um quarto deste valor não deve ser ultrapassado.
- Amostragem: O valor da concentração de gás traçador em qualquer ponto do edifício não deve ultrapassar em 5% o valor médio obtido em distintas localizações do mesmo, para garantir que o edifício se comporta como zona única.
- Precisão dos resultados: o erro cometido na determinação do valor da taxa de infiltrações deverá ser inferior a 10% do valor medido.

3.2.2 Equipamento utilizado no ensaio dos gases traçadores

O equipamento utilizado nos ensaios é composto por três partes distintas, equipamento de injeção de gás traçador, sondas de recolha de amostras de ar e equipamento de análise de amostras de ar. Estes equipamentos serão descritos de seguida.

3.2.2.1 Equipamento de Injeção de gás traçador

A injeção de CO_2 na casa modelo é um processo simples do ponto vista conceptual. Na Figura 3.9 está presente o reservatório de CO_2 utilizado durante os ensaios experimentais. Como o CO_2 dentro do reservatório se encontra pressurizado, implementaram-se duas válvulas redutores de pressão para que a injeção de gás traçador se procedesse de forma controlada. A primeira válvula redutora de pressão, assinalada na Figura 3.10 como (a), reduz a pressão de 100 para 50 bar, enquanto que a segunda válvula (c) reduz a pressão de 50 bar para uma pressão passível de ser

regulada pelo acionamento de (e). Quanto maior a pressão verificada em (d) maior o caudal de CO_2 injetado.



Figura 3.9: Reservatório de CO_2

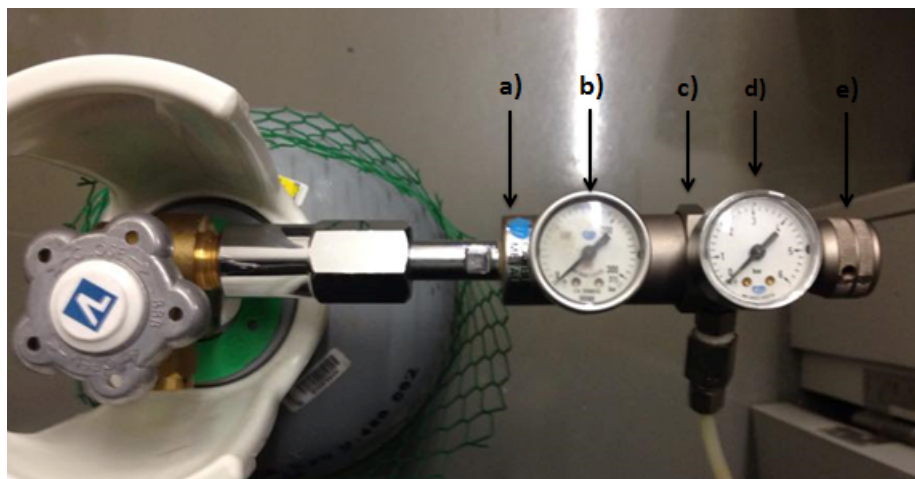


Figura 3.10: Reservatório de CO_2 : a) válvula redutora de pressão, b) manómetro, c) válvula redutora de pressão, d) manómetro, e) regulador de pressão

Ao seleccionar-se o método do declive para a implementação do ensaio dos gases traçadores apenas é necessário injetar uma certa quantidade de CO_2 para que a concentração deste gás dentro do espaço de teste aumente até um determinado valor inicial (C_0). Não há nenhuma especificação na norma ASTM E 741, [10], que indique qual C_0 a adotar em cada situação. A utilização de uma concentração inicial elevada é mais indicada para espaços com elevadas taxas de infiltrações e permite fazer ensaios com maiores durações diminuindo o erro da determinação da taxa de infiltrações, contudo, para que a concentração de CO_2 seja elevada é necessário introduzir uma maior quantidade de CO_2 (maiores custos experimentais) e a alta de concentração deste gás pode provocar problemas de saúde para quem realiza os ensaios.

Como o valor de C_0 a adotar depende do valor da taxa de infiltrações (valor que se pretende determinar) o seu valor mais adequado só pode ser obtido empiricamente. Por este motivo realizaram-se ensaios preliminares por um lado para, verificar a funcionalidade de todos os equipamentos e por outro, ter uma sensibilidade da grandeza da taxa de renovações de ar que influencia as condições iniciais das experiências incluindo: C_0 , tempo de amostragem (explicado na secção 3.2.2.2) e o número de sondas de recolha de ar (explicado na secção 3.2.2.3). Os ensaios preliminares e as conclusões daí retiradas estão presentes na secção 3.2.3.

Antes da injeção de gás traçador, pode-se calcular a massa de CO_2 a introduzir no espaço de teste para que a sua concentração aumente até C_0 .

$$m_{CO_2} = V \times [1,94 \times 10^{-6} \times (C_0 - C_a)] \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, V trata-se do volume do espaço estimado sendo este $37,5 \text{ m}^3$. C_a e C_0 dizem respeito à concentração de CO_2 antes e depois da sua injeção, respetivamente, sendo que ambas as concentrações estão expressas em partes por milhão [ppm]. É de salientar que antes de cada ensaio abriu-se a janela e a porta da TDF durante um período aproximadamente igual a 15 min com o intuito de equilibrar a concentração de CO_2 no seu interior com o exterior. Para conseguir quantificar a massa de CO_2 introduzida em casa ensaio utilizou-se uma balança digital (TST - 12005) do fabricante CLIMASTOCK. A balança em questão (ver Figura 3.11) tem um resolução de 0,005 Kg e uma carga máxima de 120 kg. O erro relativo na medição da massa através desta balança é igual a $\pm 0,5\%$ [17].

Segundo a norma ASTM E 741 [10] não deverá ocorrer qualquer abertura de portas ou janelas após a injeção de gás traçador durante o ensaio. O cumprimento da norma traz assim uma dificuldade experimental, pois como ninguém pode permanecer no interior da casa modelo durante os ensaios (pois as pessoas são fontes de CO_2), a injeção de CO_2 tem de ser feita recorrendo a válvulas proporcionais (passíveis de serem acionadas à distância) isto assumindo que o reservatório de CO_2 se encontra no interior da casa modelo. Tendo em conta o equipamento disponível decidiu-se que a melhor solução era fazer a injeção de CO_2 a partir do exterior da TDF. Para tal teve de ser fazer um furo na parede orientada a norte e introduzir o tubo que transporta o CO_2 do exterior para o interior da TDF como se mostra na Figura 3.12. Na Figura 3.13 e 3.14 consegue-se observar a forma como ocorre a

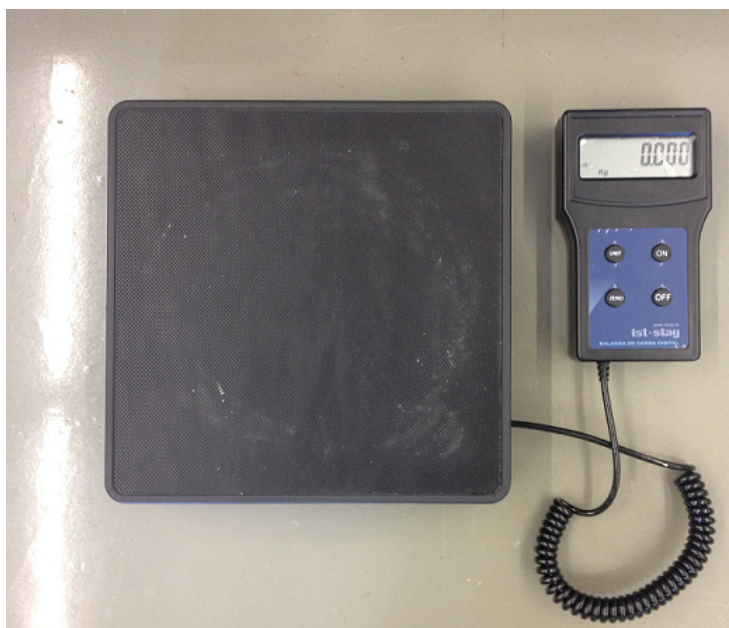


Figura 3.11: Balança e respetivo mostrador digital utilizada para medir a massa de CO_2 a introduzir na TDF.

injeção e distribuição de CO_2 na TDF respetivamente.

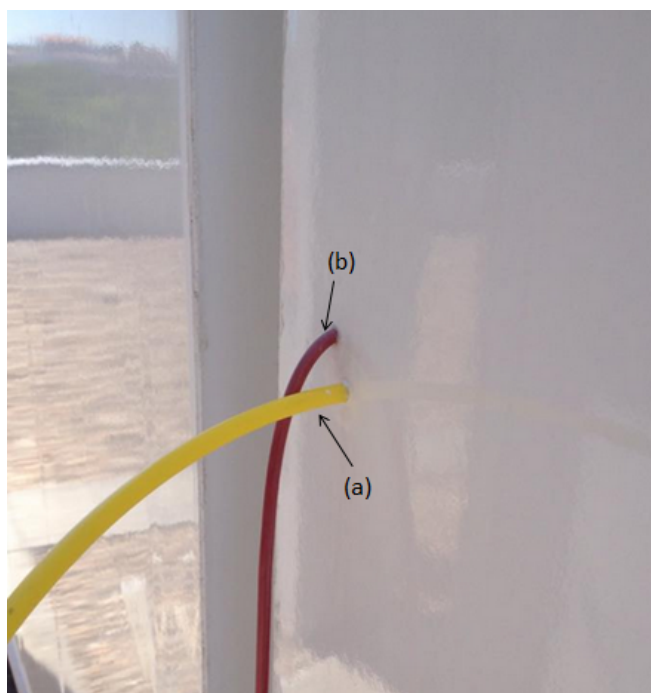


Figura 3.12: Tubo transportador de gás traçador (a) e cabo de eletricidade (b) e implementados na parede norte da TDF.



Figura 3.13: Injeção de CO_2 a partir do exterior da TDF.



Figura 3.14: Distribuição de CO_2 no interior da TDF.

Ainda é relevante referir que o CO_2 utilizado nos ensaios experimentais tem uma concentração em volume igual a 99 % e também que toda a tubagem necessária á distribuição de gás traçador pela casa modelo é feita em polipropileno por este material ser inerte em relação ao CO_2 .

3.2.2.2 Equipamento de recolha e análise de amostras de ar

O equipamento utilizado para fazer a recolha e análise de amostras de ar foi o analisador multi-gás foto acústico (*Photoacoustic multi gas analyzer*) do modelo 1312 desenvolvido e fabricado pela INNOVA. Uma fotografia do equipamento em questão é apresentada na Figura 3.15). O princípio de medição é baseado no método foto acústico de deteção de radiação infravermelha, o que na prática significa que este equipamento consegue medir a concentração de qualquer gás presente na atmosfera desde que este absorva radiação infravermelha. O equipamento considerado consegue medir, em simultâneo, a concentração de 5 gases mais vapor de água. Para isso possui 6 filtros óticos no seu ciclo de medição (ver Figura 3.16). O limite de deteção deste equipamento dependente do gás, normalmente está no regime da parte por bilião [ppb]. A exatidão das medições é assegurada pela sua capacidade de compensar a variação da temperatura e pressão durante a medição comparando com as condições de calibração. É relevante também referir que se consegue eliminar a interferência do vapor de água e de outros gases presentes na atmosfera. A precisão dos resultados é assegurada por testes internos realizados pelo equipamento de forma automática [18].



Figura 3.15: Analisador multi-gás foto acústico modelo 1312 da INNOVA.

Uma representação esquemática do ciclo de medição do analisador é apresentada na Figura 3.16, que pode ser resumida da seguinte forma [18]:

- 1 A bomba presente no interior do equipamento aspira ar pelo ponto de recolha e expulsa a porção de ar já analisada. O sensor de pressão tem a função de averiguar se a aspiração foi feita corretamente e em simultâneo medir a pressão atmosférica. A amostra de ar recolhida é hermeticamente isolada na célula de análise pelo fecho das válvulas de admissão e de saída.
- 2 A fonte de infravermelhos emite radiação (infravermelha) espectral que é refletida no espelho, esta atravessa uma roda mecânica de corte o que vai provocar a pulsação da radiação em causa sendo que esta, posteriormente, atravessa um dos filtros óticos presentes na roda de filtros óticos.
- 3 A amostra de ar contida no interior da célula de análise vai absorver, de forma seletiva a radiação transmitida pelo filtro ótico. Como a radiação em questão é

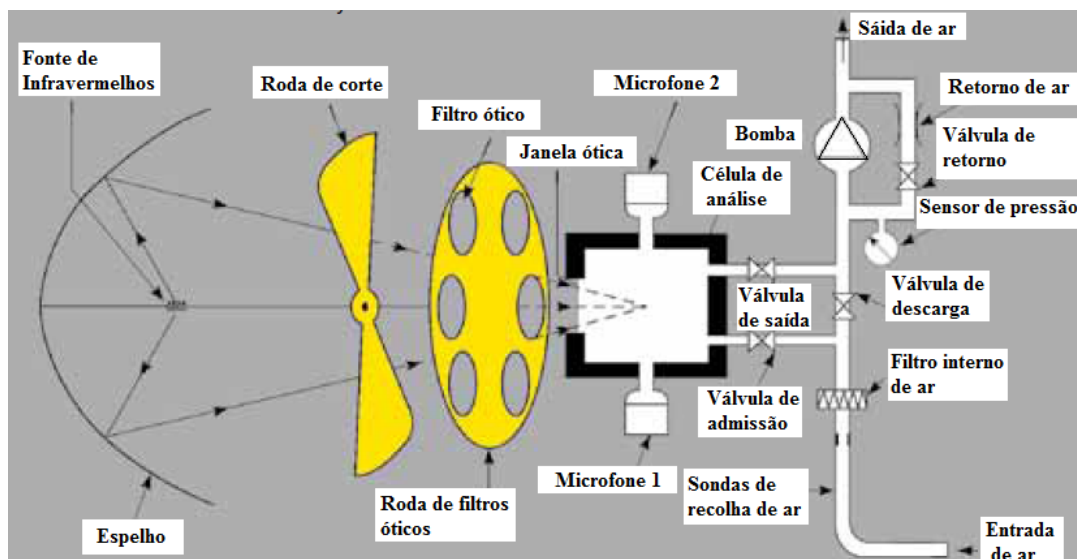


Figura 3.16: Sistema de medição do equipamento *Photoacoustic multi gas analyzer* 1312, (Adaptado de [18]).

pulsante ocorre o aquecimento e arrefecimento do gás em análise o que provoca uma variação da pressão da amostra de ar (sinal acústico).

- 4 Dois microfones instalados na célula de análise medem o sinal acústico gerado, sendo que este é diretamente proporcional á concentração do gás a ser medido na amostra de ar.
- 5 A roda de filtros óticos é acionada para que a radiação atravessasse outro filtro ótico e desta forma ser possível medir a concentração de outro gás contido na célula de análise. O número de vezes que esta operação é repetida é função do numero de gases cuja concentração se pretende medir.
- 6 A bomba entra novamente em funcionamento expulsando a porção de ar analisada e aspirando uma "nova"porção de ar para analisar.

Tendo sido descrito o ciclo de medição deste equipamento, é pertinente analisar as variáveis a definir no início de cada ensaio. O primeiro a fazer é definir quantos e quais os gases a analisar pelo equipamento sendo que nas experiências levadas a cabo na TDF apenas se registou a evolução temporal do CO_2 . Este equipamento efetua a medição da concentração de CO_2 a intervalos fixos (definidos pelo utilizador) e na Figura 3.17 é feita uma representação esquemática deste tipo de amostragem.

Outra variável a definir no início de cada ensaio é o tempo de integração das amostras de ar (*Sample Integration Time - S.I.T*) que se trata do tempo em que a amostra de ar permanece dentro da célula de análise (ver Figura 3.16). Quanto maior o tempo de integração maior a exatidão do valor medido. Na Tabela 3.1 apresenta-se alguns valores do tempo de integração dependendo da velocidade da medição.

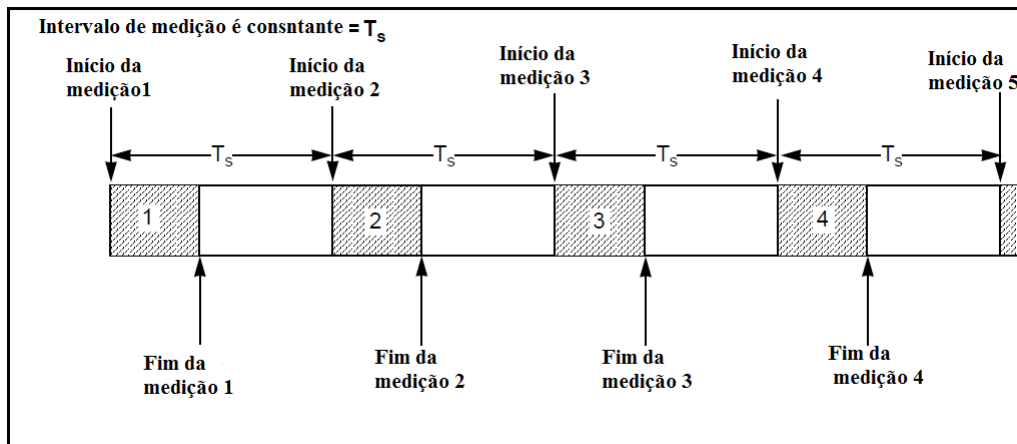


Figura 3.17: Representação esquemática da amostragem através de intervalos fixos, (Adaptado de [18]).

Tabela 3.1: Tempos de integração disponíveis no equipamento *Photoacoustic multi gas analyzer* 1312 em função da velocidade de medição, (Adaptado de [18]).

Velocidade de medição	Tempo de Integração
Rápido	1s
Normal	2s
Lenta	20s
Ajustável	0.5s, 50s

Por último, o comprimento da sonda de recolha de ar dever ser definido. Esta informação é de extrema importância para a viabilidade das medições efetuadas, pois é desta forma que o equipamento determina o tempo de funcionamento da bomba (ver Figura 3.16). Num determinado instante de medição o volume total de tubo deve ser no analisador pela bomba. Se o comprimento de tubo for demasiado pequeno pode haver interferência entre amostras, se for demasiado alto limita o tempo de amostragem (T_a). O tempo de resposta do equipamento: intervalo de tempo que decorre desde o momento em que o ar começa a ser aspirado, analisado e posteriormente expulso para o exterior, está representado na Figura 3.17 como sendo a área a tracejado.

O tempo de resposta é uma função das variáveis seguintes [18]:

- Comprimento da sonda de recolha de ar.
- S.I.T (*Sample Integration Time - S.I.T*).
- Número de gases a analisar.

O manual de instruções deste equipamento [18] fornece exemplos de tempo de resposta em função destes parâmetros (ver Tabela 3.2). Se o tempo de resposta for superior ao tempo de amostragem (definido pelo utilizador) o equipamento mostra

uma mensagem de erro e aconselha o utilizador a alterar os parâmetros de entrada.

Tabela 3.2: Tempo de resposta do equipamento *Photoacoustic multi gas analyzer* 1312, (Adaptado de [18]).

Setup do monitor	Tempo de resposta	
	1 Gás	5 Gases + Vapor de Água
S.I.T: Normal (5s) e tubo de 1 m	27s	60s
S.I.T: Lenta (20s) e tubo de 1 m	(não especificado)	150s
S.I.T: Rápido (1s) e sem tubo	13s	26s

Outro equipamento que foi utilizado para medir a concentração de CO_2 presente na atmosfera é o medidor capacitivo testo 400 fabricado pela empresa TESTO (ver Figura 3.18). Ao conectar-se uma sonda de medição de CO_2 a este equipamento é possível registar a evolução temporal deste gás num determinado espaço e assim determinar a taxa de infiltrações aí existente. O princípio de medição desta sonda baseia-se na absorção de radiação infravermelha contudo, como este equipamento não faz recolha de amostras de ar a concentração medida apenas diz respeito ao ponto onde se localiza a sonda de medição [19]. Comparativamente ao analisador Innova-1312 este equipamento é mais fácil de transportar e mais barato, por outro lado não tem a capacidade de medir a concentração de vários gases em simultâneo e o utilizador não tem a possibilidade de definir o S.I.T.



Figura 3.18: Testo 400 e sonda de medição de CO_2 .

3.2.2.3 Sondas de recolha de ar

A amostra de ar recolhida entra no analisador através de uma rede de tubos pneumáticos frequentemente chamada de integrador. No presente caso, o integrador é substituído por tubos de poliestireno com 3,75 mm de diâmetro interno. A norma ASTM E 741 [10] não define o número de pontos de recolha de ar a implementar, sendo que se optou por fazer a recolha de amostras de ar com uma sonda presente no laboratório de climatização da faculdade. A sonda em questão (ver Figura 3.19) tem a particularidade de poder ser facilmente modificada para recolher ar em 8, 4 e 2 pontos. Isto permite estudar como o número de pontos de recolha de ar tem influência na determinação da taxa de infiltrações (ver secção 4.1).



Figura 3.19: Fotografia das sondas de recolha de ar.

Para a amostra ser o mais representativa, o fluxo de ar transportado em cada sonda deve ser o mesmo. Tendo em conta que o diâmetro interno é igual em todos os tubos utilizados, a forma mais simples e prática de igualar a perda de carga nas diferentes posições de recolha é utilizar o mesmo comprimento de tubo e prestar atenção à configuração das junções. Na Figura 3.20 está presente uma representação esquemática da sonda de recolha de ar. Na situação particular esquematizada na fig 3.20 a sonda está configurada para fazer recolha de ar em quatro pontos distintos dentro da TDF e como se pode observar, o comprimento de tubo pneumático desde o ponto em que é feita a ligação ao equipamento de medição até a cada posição de recolha de ar é igual.

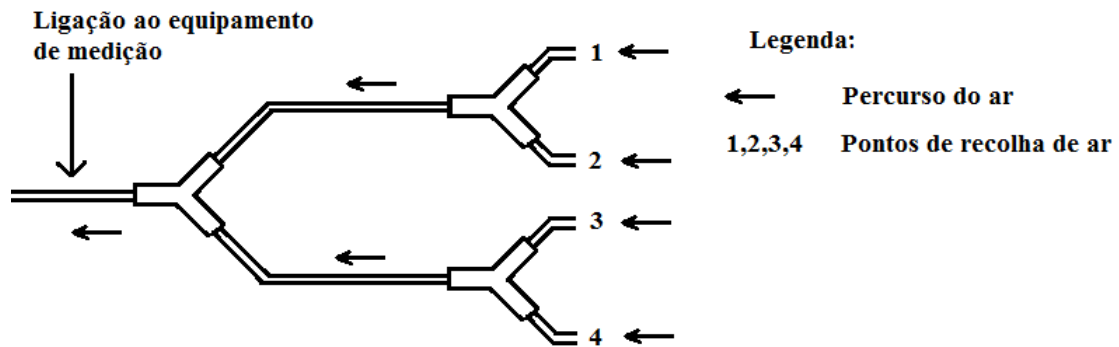


Figura 3.20: Representação esquemática da sonda de recolha de ar.

Na literatura, um dos tópicos normalmente abordado está relacionado com a influência da distribuição espacial das sondas de recolha de ar na determinação da taxa de infiltrações. Em [9] chegou-se á conclusão que mesmo em volumes de teste pequenos, a distribuição espacial dos pontos de recolha de ar tem uma forte influência nos resultados obtidos. Com o intuito de fazer um estudo semelhante ao que foi levado a cabo em [9], implementaram-se diferentes distribuições espaciais para as sondas de recolha de ar. No Anexo B estão presentes as diferentes configurações e respetivas distâncias relevantes implementadas nos ensaios experimentais realizados na TDF.

3.2.3 Ensaaios preliminares

Pelas razões mencionadas na secção 3.2.2.1 realizaram-se 3 ensaios preliminares sendo que o primeiro decorreu durante o dia 9 de Abril de 2015. Os dados técnicos relevantes sobre o ensaio em questão encontram-se resumidos na Tabela 3.3. O equipamento utilizado para a medição da concentração de gás traçador foi o equipamento *Photoacoustic multi gas analyzer* 1312 e a distribuição espacial das sondas de recolha de ar foi a 8-C1 podendo esta ser consultada na Figura B.2 presente no Anexo B.

Tabela 3.3: Dados técnicos relevantes do ensaio realizado dia 9 de Abril.

Dados Técnicos	Ensaio dia 9 de Abril
Duração do ensaio	7h20min
m_{CO_2}	100g
C_0	1930 ppm
S.I.T	Normal:2s
Tempo de amostragem – (T_a)	1 min
Nº de pontos de recolha de ar	8

A evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio encontra-se representada na Figura 3.21.

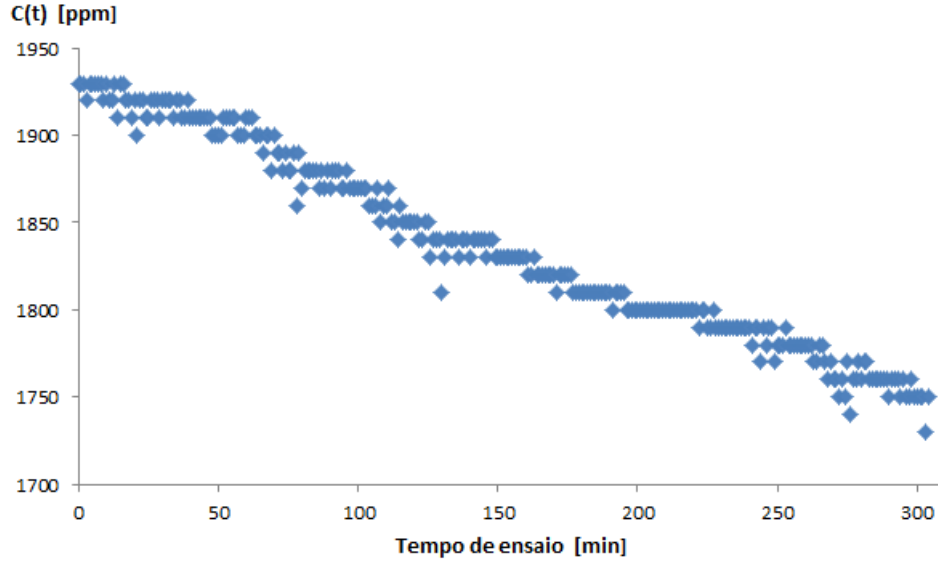


Figura 3.21: Evolução temporal da concentração de CO_2 no ensaio realizado dia 9 de Abril.

Analisando a Figura 3.21 consegue-se constatar que a concentração de CO_2 varia lentamente o que explica os vários "degraus" presentes na figura anteriormente mencionada. Desde já se pode concluir que um tempo de amostragem (T_a) de 1 min é excessivamente reduzido tendo em conta a taxa de variação temporal de CO_2 . A determinação da taxa de infiltrações (λ) é efetuada aplicando um regressão linear após a linearização do modelo através da equação 2.8 o ajustamento linear que resultou num coeficiente de relação (R^2) de 0,98 pode ser observado na Figura 3.22.

Como se pode verificar pelas Figuras 3.21 e 3.22 a evolução temporal de CO_2 está expressa em minutos, logo para determinar λ em $[h^{-1}]$ tem de se multiplicar o valor obtido na linearização por 60. Pode-se então concluir que $\lambda = 2,35 \cdot 10^{-2} h^{-1}$.

Através do tratamento de dados feito no *Excel* é possível estudar a influência de T_a na determinação de λ . Filtrando os resultados obtidos em intervalos de 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 minutos determinou-se λ para cada T_a . Na Tabela 3.4 são apresentados os coeficientes de determinação (R^2) em função de T_a . Este coeficiente é uma medida da qualidade de ajustamento de um modelo linear generalizado (caso experimental). O R^2 varia entre 0 e 1, podendo ser interpretado com um indicador, em percentagem, dos dados que o modelo consegue explicar. Quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo e melhor se ajusta aos resultados obtidos.

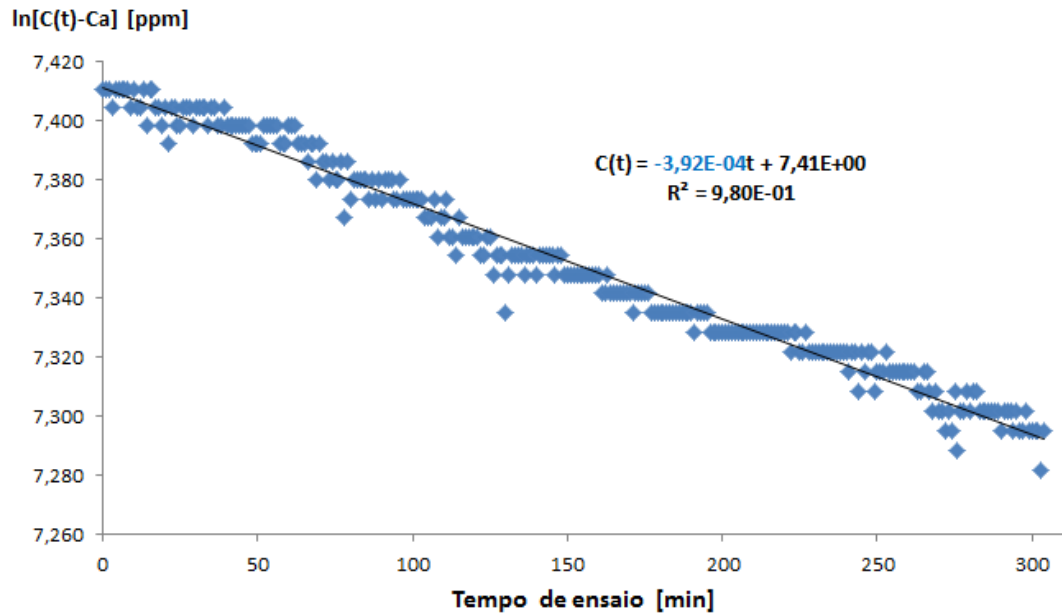


Figura 3.22: Regressão linear feita aos resultados experimentais referentes ao ensaio de 9 de Abril.

Tabela 3.4: λ e R^2 em função de T_a .

Ensaio dia 9 de Abril		
T_a – [min]	λ – [h^{-1}]	R^2 – [%]
1	$2,35 \cdot 10^{-2}$	98,0
3	$2,34 \cdot 10^{-2}$	98,2
4	$2,36 \cdot 10^{-2}$	98,3
5	$2,33 \cdot 10^{-2}$	98,5
6	$2,33 \cdot 10^{-2}$	98,4
7	$2,33 \cdot 10^{-2}$	98,4
8	$2,36 \cdot 10^{-2}$	98,5
9	$2,42 \cdot 10^{-2}$	98,4
10	$2,38 \cdot 10^{-2}$	98,5

Aumentando o intervalo entre os instantes de medição (T_a) verifica-se que R^2 também aumenta o que indica que tempos de mostragem mais elevados contribuem para uma melhor ajuste ao modelo linear. Nesta tabela também se verifica que λ não varia significativamente com o aumento de T_a . Em função do λ determinado e da informação retirada desta tabela decidiu-se implementar um $T_a = 5$ min nos restantes ensaios realizados.

Com a realização deste ensaio preliminar é também possível aferir em relação a qual valor de C_0 a implementar durante os restantes ensaios. Como o λ determinado é bastante reduzido conclui-se que o C_0 adotado é suficientemente elevado para a correta determinação da taxa de infiltrações o que na prática significa que a massa de CO_2 injetada na TDF é de igual forma suficiente para o sucesso dos ensaios experimentais. Decidiu-se portanto introduzir 100g de CO_2 nos restantes ensaios realizados.

Outro aspeto relevante dos ensaios com os gases traçadores é a duração dos mesmos. A norma ASTM E 741, [10], indica a mínima duração dos ensaios a realizar em função da taxa de infiltrações medida (ver Tabela 3.5). Extrapolando para o valor obtido experimentalmente conclui-se que duração mínima de cada ensaio deverá ser aproximadamente igual a 42h30min.

Tabela 3.5: Duração mínima recomendada de ensaio em função de λ , (Adaptado de [10]).

Taxa de infiltrações (λ) – [h^{-1}]	Duração mínima do ensaio – [h]
0,25	4
0,5	2
1	1
2	0,5
4	0,25

Nos outros dois ensaios preliminares realizados não pretendeu-se essencialmente testar o equipamento de medição teste 400. Em ambos ensaios deixou-se a janela aberta (ver Figura 3.23). A localização da sonda de medição foi diferente nos dois ensaios (ver Figura 3.23 e 3.24). A sonda de medição no ensaio de 28 de abril foi colocada a uma distância aproximadamente igual a um metro da janela enquanto no ensaio de dia 29 de Abril a sonda foi colocada no outro extremo da TDF a uma distância aproximadamente igual a dois metros e meio da janela.



Figura 3.23: Abertura da janela durante os 2 ensaios experimentais preliminares.



Figura 3.24: Localização da sonda de medição durante o ensaio de 28 de Abril.



Figura 3.25: Localização da sonda de medição durante o ensaio de 29 de Abril.

As evoluções temporais da concentração de CO_2 durante os dois ensaios em questão e as respectivas regressões lineares são apresentadas nas figuras 3.26 a 3.27.

Visto que nestes dois ensaios a janela da TDF permaneceu aberta não se determinou a taxa de infiltrações (λ) da TDF mas sim a taxa de renovação natural do ar (r_n). São duas situações conceptualmente diferentes, contudo, o modelo matemático apresentado na secção 2.1.4.1 é valido para ambas. A única diferença é a substituição feita $\dot{V} = \lambda$ na equação 2.7 passa a ser $\dot{V} = r_n$. Após a linearização já descrita anteriormente foi possível determinar r_n para cada um dos ensaios. As duas regressões lineares estão representadas na Figura 3.27.

A temperatura exterior média durante os ensaios de 28 e 29 de Abril foi de 14,8 e 15,1 °C e a velocidade média do vento foi de 1,9 e 2,3 km/h, respetivamente [20]. O valor de r_n para o ensaio de 28 de abril foi de 1,61 h⁻¹ enquanto que para o ensaio de 29 de abril foi de 2,55 h⁻¹. A variação das condições meteorológicas durante os dois não explica o aumento de 58,4% da taxa de renovação do ar verificada, podendo-se concluir que a diferença nos resultados obtidos deve-se essencialmente á posição da sonda de medição. A principal conclusão a retirar destes dois ensaios preliminares é que caso se faça a medição da concentração de CO_2 num só ponto, a sua localização tem uma forte influência nos resultados experimentais.

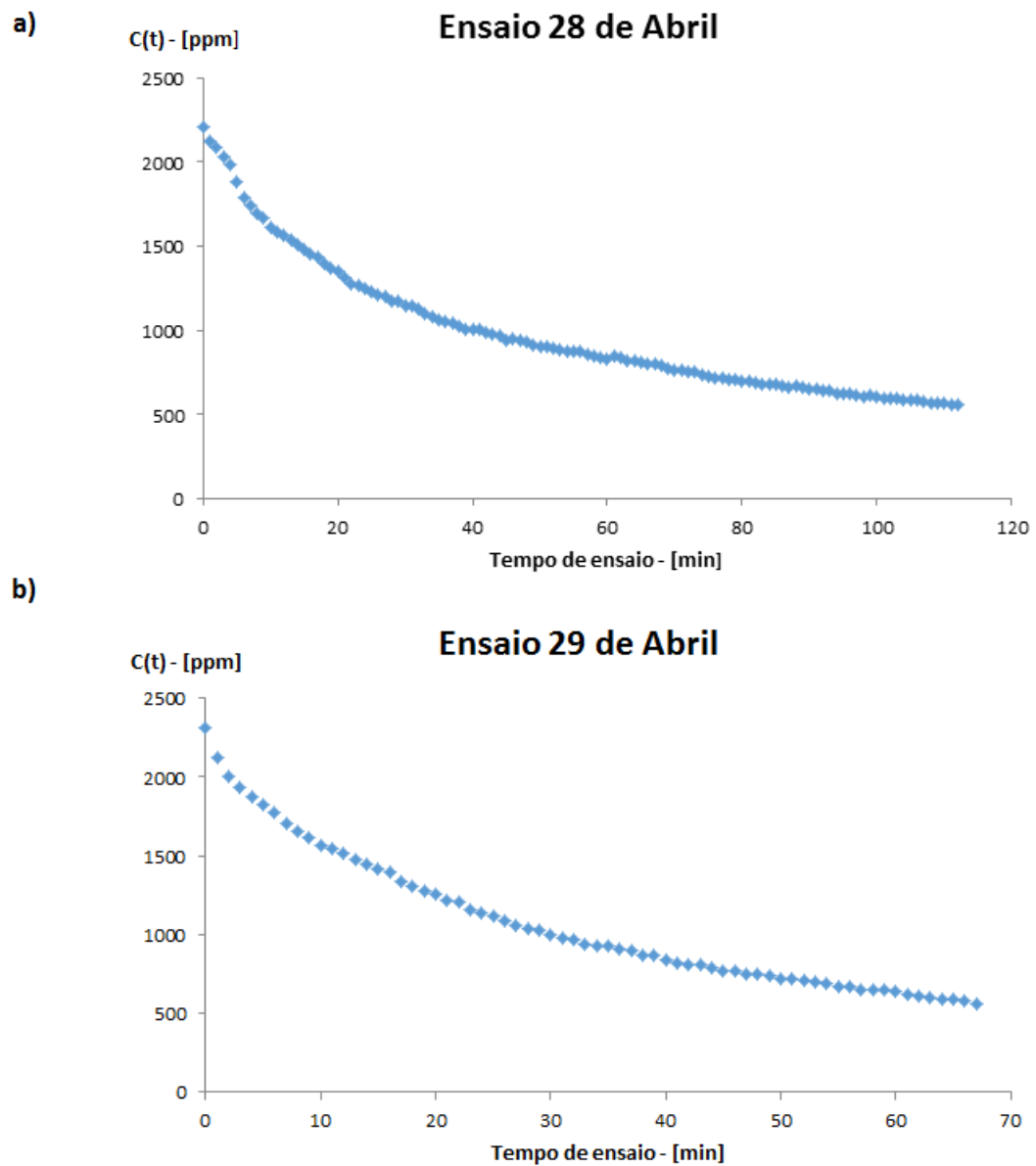


Figura 3.26: Evolução temporal da concentração de CO_2 no ensaio realizado dia 28 de Abril (a) e no dia 29 de abril (b).

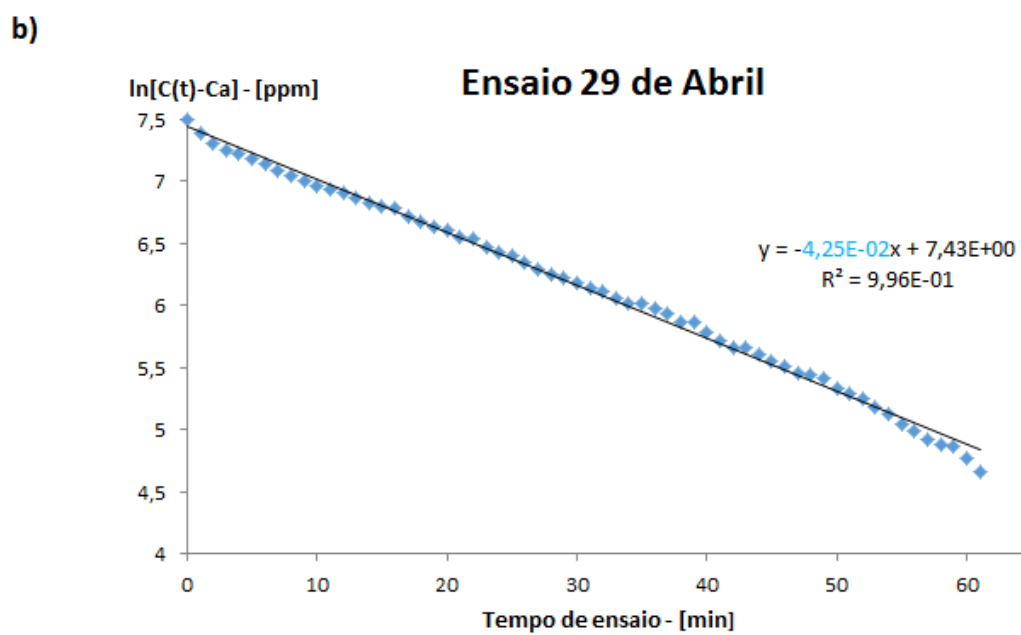
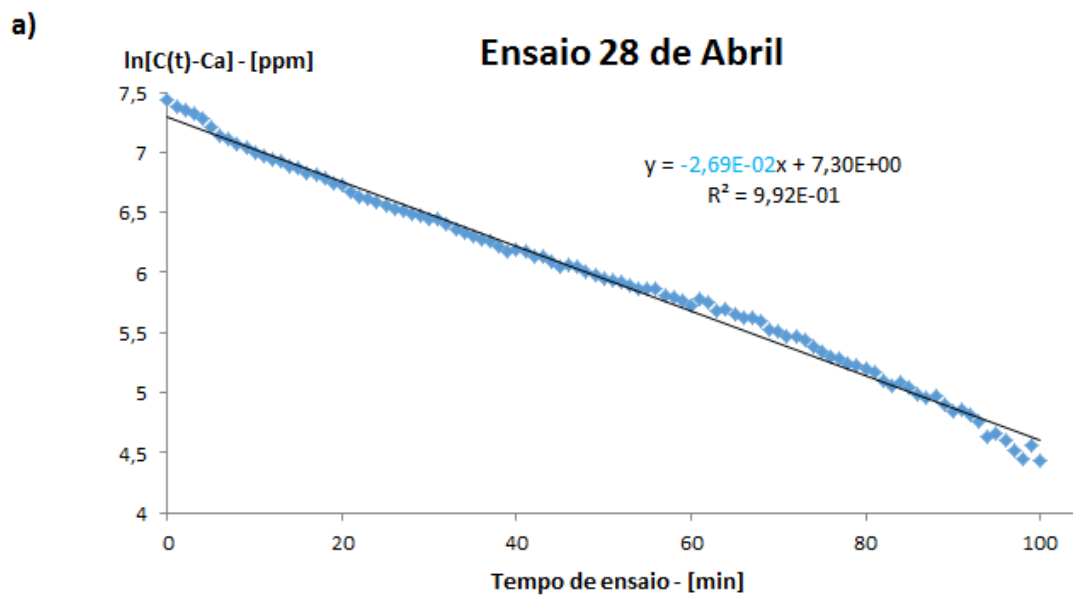


Figura 3.27: Regressão linear feita aos resultados experimentais de dia 28 de Abril (a) e de dia 29 de Abril (b).

3.2.4 Análise de incertezas e de propagação de erros

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos pela implementação dos ensaios dos gases traçadores e da porta ventiladora. Para uma melhor compreensão, é imprescindível ter-se conhecimento da incerteza associada aos resultados experimentais. Na presente secção faz-se uma breve introdução sobre a temática da análise de incertezas e de propagação de erros e de seguida estuda-se a incerteza cometida na determinação da taxa de infiltrações da TDF.

Sempre que se implementa uma abordagem experimental, a questão sobre qual deverá ser a qualidade dos dados experimentais a obter deve ser colocada muito antes da instalação experimental ser construída e os resultados experimentais obtidos [21]. Se a resposta ou a solução deve ser conhecida dentro de por exemplo, um erro relativo de $\pm 5\%$ para que seja útil, não faz sentido gastar tempo e dinheiro a realizar uma experiência para no final descobrir que o valor provável do erro será superior a 5% [21]. A incerteza é normalmente usada para descrever a qualidade de uma medição ou resultado experimental sendo que a análise de incertezas constitui uma ferramenta poderosa, sobretudo numa fase de planeamento e projeto de experiências [21]. A incerteza de uma determinada medição é constituída por dois tipos de dois erros: erros sistemáticos e erros aleatórios. Para melhor entender estes dois conceitos apresenta-se a Figura 3.28.

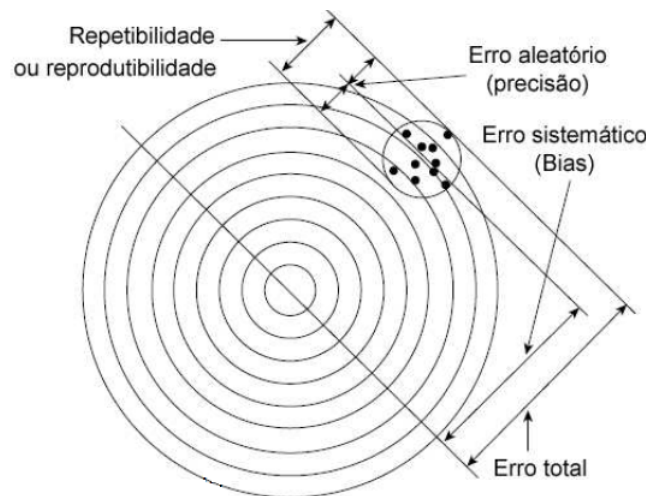


Figura 3.28: Representação esquemática de alguns conceitos relacionados com a análise de incertezas [21].

O erro sistemático (B_X) de uma mensurada X diz respeito á exatidão da medida efetuada, podendo ser definido como a componente fixa ou constante do erro total. O erro aleatório (P_X) quantifica com um limite de confiança á volta de um média de uma amostra de N dimensões da variável X obtidas que segue uma distribuição estatística supostamente conhecida. O erro total na medição de uma mensurada X (δ_X) trata-se da soma do erro aleatório com o erro sistemático. Outro conceito representado na Figura 3.28 é a repetibilidade podendo ser definido como a proximidade do resultado de medições realizadas, nas mesmas condições de medição, enquanto

se mede repetidamente a mesma mensurada estando este conceito associado ao erro aleatório [21]. Se o pretendido é fazer estimativa da média (μ_X) de X baseado em medições, é tipicamente mais vantajoso determinar um intervalo ($2 \cdot \delta$) à volta da média amostral onde μ_X cai com um determinado nível de confiança pretendida:

$$\bar{X} - \delta_X < \mu_X < \bar{X} + \delta_X \quad (3.2)$$

Em muitos casos não se mede diretamente uma quantidade, em vez disso, medem-se outras variáveis e aplica-se uma combinação destas numa equação de redução de dados, como por exemplo, num escoamento turbulento no interior de um tubo. O coeficiente de convecção (h) pode ser obtido através da seguinte equação de redução de dados:

$$\frac{hD}{\lambda} = 0,0023 \left(\frac{\rho v D}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{\nu}{\lambda \sqrt{\rho C_p}} \right)^n \quad (3.3)$$

Supondo que existe um erro na medição da velocidade média de escoamento (v) e na medição do diâmetro do tubo (D). Considerando que todas as outras variáveis tem um erro desprezável, a propagação do erro de v e D em h pode ser obtida por:

$$U_h = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial v} U_v \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial D} U_D \right)^2 \right] \quad (3.4)$$

Considerando agora um caso geral em que um resultado experimental é uma função de J variáveis independentes, de forma: $r = f(X_1, X_2, \dots, X_J)$. A incerteza no resultado (U_r) é dada pela seguinte equação [21]:

$$U_r = \left[\left(\frac{\partial r}{\partial X_1} U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial X_2} U_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial r}{\partial X_J} U_{x_J} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.5)$$

Na equação 3.5, U diz respeito às incertezas das variáveis medidas X_i e $\frac{\partial r}{\partial X_i}$ aos coeficientes de sensibilidade. A expressão parte dos pressupostos que os dados e as derivadas são contínuas no domínio de interesse [21]. Todas as incertezas (U_{x_i}) sistemáticas ou aleatórias devem estar expressas no mesmo nível de confiança, tipicamente 95%. Nesse caso, a incerteza obtida para os resultados tem também um nível de confiança de 95%.

Aplicando os conceitos acima apresentados, o primeiro passo na quantificação dos erros associados à determinação da taxa de infiltrações com o método dos gases traçadores é identificar quais as fontes de erro sistemático. A única quantidade medida nestes ensaios é a concentração de CO_2 . Os dois equipamentos utilizados para sua medição possuem um determinado nível de exatidão que se apresenta na Tabela 3.6.

Como se pode constatar pela Tabela 3.6, o medidor INNOVA 1312 possui uma maior exatidão do que o medidor capacitivo Testo 400, o que poderia levar a concluir que este equipamento seria mais adequado à realização dos ensaios. A taxa de infiltrações (λ) obtém-se do declive da regressão linear feita aos resultados experimentais após a linearização (equação 2.8). Assumindo que o erro sistemático afeta todas as medições no mesmo valor e sentido, o seu valor não afeta o declive da regressão linear,

Tabela 3.6: Exatidão dos equipamentos utilizados nos ensaios com os gases traçadores.

Equipamento de medição	Exatidão $\pm B$ [ppm]
INNOVA 1312 [18]	2
Testo 400 [19]	5

consequentemente não afeta a determinação de λ . Daqui pode-se concluir que o erro na determinação da taxa de infiltrações está apenas afetado por um erro aleatório. Este erro pode ser estimado após a regressão linear aos resultados experimentais. Considerando um modelo linear, e um conjunto de dados experimentais, (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , ..., (X_N, Y_N) . É possível estimar o erro padrão da variável dependente (S_Y) através da seguinte equação [21]:

$$S_Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - Y(X_i))^2}{N - 2} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - mX_i - c)^2}{N - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Na equação 3.6, m e c dizem respeito ao declive e à ordenada determinados pela regressão linear, respetivamente. Ao estimar o valor de S_Y é assumido a ausência de incerteza nos valores de X_i e que o modelo linear é válido. Esta consideração pode ser feita no caso do ensaio dos gases traçadores visto que os valores de X_i dizem respeito ao tempo de ensaio podendo-se desprezar a incerteza na sua medição [21].

As expressões que permitem estimar o desvio padrão do estimador do declive (S_m) e da ordenada na origem (S_C) do modelo linear são:

$$S_m = \left(\frac{S_Y^2}{S_{XX}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$S_C = \left[S_Y^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{\bar{X}^2}{S_{XX}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Na equação 3.8 \bar{X} é a média amostral da variável independente e S_{XX} é dado pela seguinte equação:

$$S_{XX} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2 - N\bar{X}^2 \quad (3.9)$$

Tendo aplicado as equações 3.6 a 3.9 é possível estimar o erro na determinação do declive (δ_m) e da ordenada na origem (δ_C):

$$\delta_m = t * S_m \quad (3.10)$$

$$\delta_C = t * S_C \quad (3.11)$$

Nas equações 3.10 e 3.11 o valor de t diz respeito o valor critico da distribuição t de *Student* para $N - 2$ graus de liberdade e um intervalo de significância de 5% [21].

Em suma, a incerteza na determinação da taxa de infiltrações (λ) é diferente de ensaio para ensaio, sendo necessário fazer o cálculo de δ_m para cada regressão linear efetuada. De acordo com a definição de intervalo de confiança, o valor de λ determinado para cada ensaio está contido, com uma confiança de 95%, no intervalo $\lambda \pm \delta_m$.

3.3 Porta ventiladora

Os fundamentos teóricos do ensaio com a porta ventiladora encontram-se presentes na na secção 2.2.2. A presente secção tem como objetivo descrever o equipamento utilizado e todo o procedimento de ensaio desde a montagem da porta até á realização do ensaio.

3.3.1 Equipamento utilizado no ensaio da porta ventiladora

Na secção atual apresenta-se o equipamento utilizado nos ensaios e as suas características relevantes. Os diferentes componentes que constituem a porta ventiladora são os seguintes: moldura, lona, ventilador e manómetros diferenciais. Como se pode ver pela Figura 3.29 a moldura em madeira pode ser aplicada em portas com diferentes dimensões tendo em conta que a sua largura e altura pode ser regulada pelo acionamento de quatro manípulos.

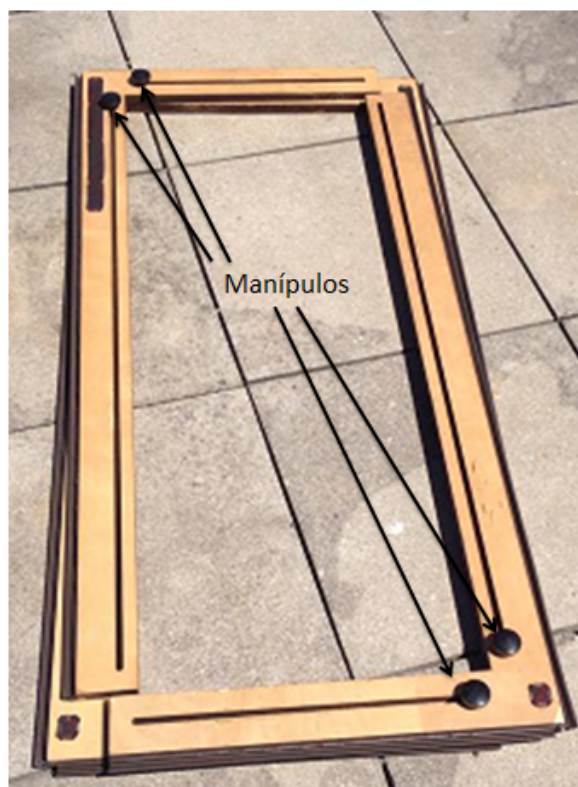


Figura 3.29: Moldura de madeira de dimensões reguláveis.

A Lona tem como função vedar a moldura de madeira e o ventilador (ver Figura 3.30).



Figura 3.30: Lona.

O ventilador utilizado é do modelo A0292 da empresa Minneapolis Blower Door, [22], opera a diferentes velocidades e tem a capacidade de inverter o sentido de rotação do seu rotor. Estas duas características são imprescindíveis visto ser necessário pressurizar e despressurizar o local de ensaio e ainda induzir vários valores de diferença de pressão entre o interior e exterior do local a testar.

Este componente (ver Figura 3.31) possui no total oito furos numa das suas faces passíveis de serem obturados, o que torna possível a sua utilização em espaços com diferentes volumes e taxas de infiltrações. O caudal de ar deslocado pelo ventilador (\dot{V}_{med}) determinado através das curvas de calibração do mesmo, podendo estas serem consultadas no Anexo C. A regulação do caudal pode ser feita em frequência ou pela alteração da secção livre do ventilador.

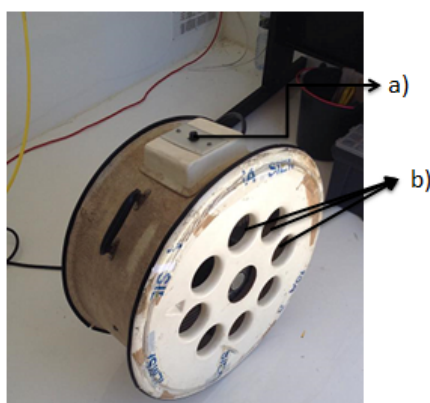


Figura 3.31: Ventilador reversível com velocidade variável

Na Figura 3.32 pode-se observar o conjunto de três manômetros utilizados. Visto que \dot{V}_{med} é medido indiretamente torna-se necessário a medição em simultâneo da variação de pressão no ventilador (ΔP_{VENT}) e da variação de pressão entre o interior e o exterior do espaço de teste (ΔP). ΔP_{VENT} é medido pelo do manômetro b) ou c) e ΔP é medido pelo manômetro a). A diferença entre o manômetro b) e c) reside na resolução e no fim de escala dos mesmos sendo que o manômetro c) é apenas utilizado em espaços com um elevado volume e/ou taxa de infiltrações. Cada manômetro possui duas tomadas de pressão: uma para pressão alta e outra para pressão baixa a serem utilizadas consoante se esteja a realizar um ensaio de pressurização ou depressurização.

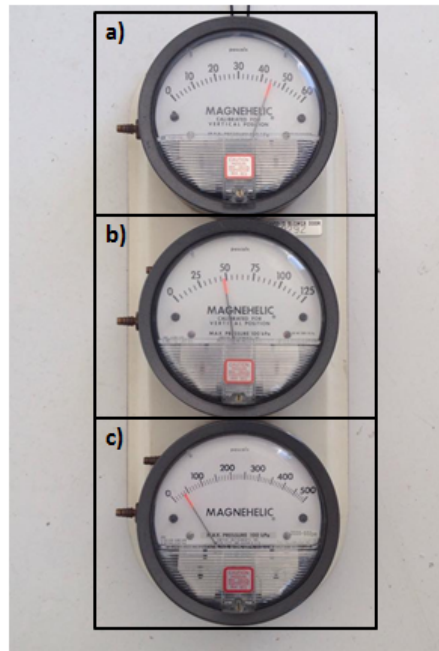


Figura 3.32: Manômetros diferenciais utilizados no ensaio. a) manômetro utilizado para medir ΔP , b) manômetro utilizado para medir ΔP_{VENT} com fim de escala de 125 Pa, c) manômetro utilizado para medir ΔP_{VENT} com fim de escala de 500 Pa.

3.3.2 Implementação do ensaio na TDF

Tendo sido descritos os principais equipamentos constituintes da porta ventiladora passa-se a explicar o modo como este ensaio é implementado na casa modelo. O primeiro passo será isolar a moldura de madeira com a lona (ver Figura 3.33 a)), de seguida, implementou-se este conjunto na porta da TDF (ver Figura 3.33 b)). Com o conjunto montado introduz-se o ventilador no orifício presente na lona (ver Figura 3.34) e colocou-se o conjunto de três manómetros na vertical pois estes foram calibrados para serem utilizados nessa posição.

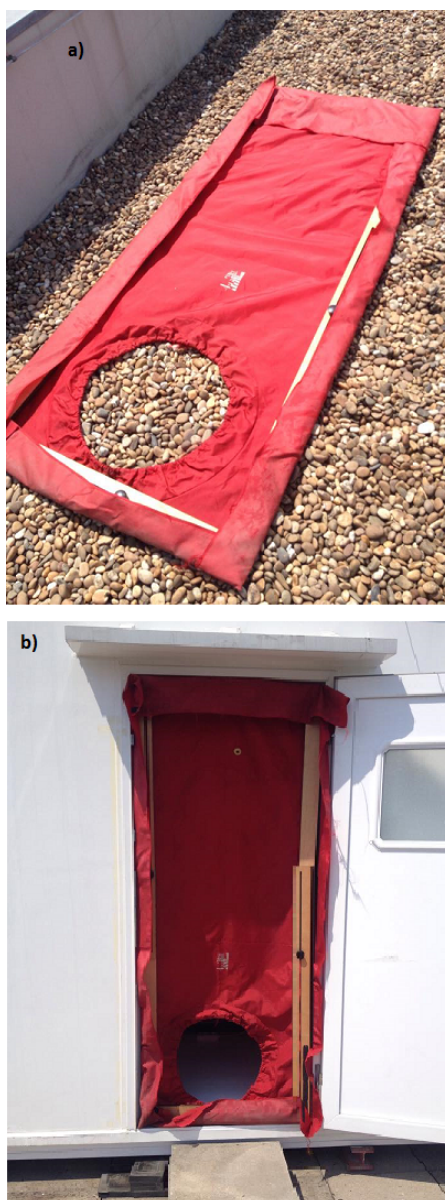


Figura 3.33: a) Isolamento da moldura de madeira com a lona, b) Moldura isolada implementada na TDF.



Figura 3.34: Instalação do ventilador na moldura isolada.

A seguinte tarefa é ligar as tomadas de pressão dos manómetros aos pontos onde a pressão é medida. A pressão interior é medida através de um orifício presente na lona (ver Figura 3.35), enquanto que a pressão a montante do ventilador é medida através de uma tomada de pressão presente na face posterior do mesmo como se pode ver na Figura 3.36. Um esquema com as ligações das tomas de pressão aos pontos de medição para os ensaios de pressurização e despressurização está representado na Figura 3.37.



Figura 3.35: Medição da pressão interior.

A diferença de pressão durante os testes é obtida aumentando-se progressivamente a velocidade de rotação do ventilador o que provoca um aumento gradual de ΔP . À medida que ΔP aumenta regista-se o valor de ΔP_{VENT} correspondente, sendo que os pares de valores registados são utilizados para determinar os indicadores ELA, I_{50} e fazer uma estimativa do nível médio das infiltrações.



Figura 3.36: Medição da pressão a montante do ventilador.

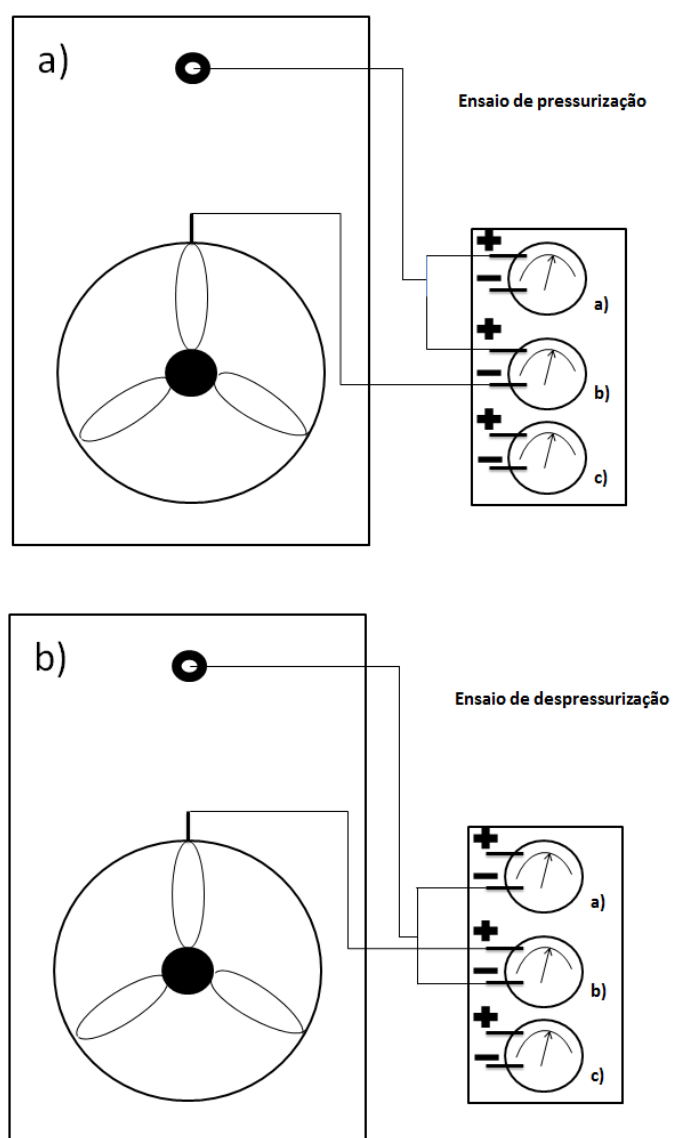


Figura 3.37: a) Esquema do ensaio de pressurização, b) Esquema do ensaio de despressurização.

3.3.3 Ensaio preliminar

Tal como sucedeu no ensaio dos gases traçadores decidiu-se realizar um ensaio preliminar com a porta ventiladora. O principal objetivo deste ensaio preliminar é testar todos os equipamentos utilizados. Implementou-se a porta ventiladora na TDF. Começou-se por realizar o ensaio de pressurização e no momento em que o ventilador foi acionado a ligação cobertura-parede (ver Figura 3.7) da parede orientada a sul começou a ceder acabando mesmo por se descolar na totalidade. Nas figuras 3.38 e 3.39 consegue-se observar o estado da junção após a realização deste ensaio. Provavelmente mesmo com uma frequência baixa, o ventilador induziu um ΔP muito elevado levando aos danos estruturais verificados.



Figura 3.38: Ligação cobertura-parede danificada após a realização do ensaio com a porta ventiladora.



Figura 3.39: Ligação cobertura-parede danificada após a realização do ensaio com a porta ventiladora.

Na configuração original da TDF (sem grelhas de circulação de ar) não se voltou a realizar mais ensaios com a porta ventiladora com o intuito de preservar a integridade estrutural da TDF. Por motivos que serão explicados na secção 4.1 instalou-se quatro grelhas de circulação de ar e após a sua inalação voltou a repetir-se o ensaio com a porta ventiladora. Conclui-se que a casa modelo possui um nível de estanquidade muito alto não tendo sido possível quantificá-lo.

3.3.4 Análise de incertezas e de propagação de erros

Na secção 3.2.4 foram introduzidos os conceitos fundamentais para análise de incertezas e propagação de erros, sendo que na presente secção faz-se o estudo da incerteza associada aos indicadores obtidos com o ensaio da porta ventiladora: ELA, I_{50} e na estimativa do nível médio anual de infiltrações (I).

Como foi explicado na secção 2.2.2, o ensaio da porta ventiladora consiste em substituir a porta de um determinado espaço por um ventilador, e determinar através da curva de calibração do mesmo, a equação característica do espaço. A estimativa de ELA, I_{50} e de I é feita através da equação característica desse espaço, consequentemente, as incertezas associadas a K e n introduzem incerteza no valor destes indicadores.

Ao linearizar a equação característica do espaço pode-se determinar a incerteza de K e n ao quantificar-se os erros da regressão linear. Aplicando logaritmos de ambos á equação característica tem que:

$$\ln(\dot{V}) = n \cdot \ln(\Delta P) + \ln(K) \quad (3.12)$$

O erro de n (declive da equação 3.12) é calculado diretamente enquanto que o erro de K (coordenada na origem da equação 3.12) é igual a e^{δ_C} . Na regressão linear é assumido que a variável independente (neste caso $\ln(\Delta P)$) não tem incerteza representativa na sua determinação.

Tal como acontece no caso dos gases traçadores, cada ensaio da porta ventiladora possui um determinado nível de incerteza. A variável n (declive) só possui erro aleatório como já foi explicado anteriormente. Na incerteza de K (coordenada na origem) contabiliza-se as componentes aleatória e sistemática no cálculo da incerteza global segundo a seguinte equação [21]:

$$\delta_K = \sqrt{(B_K)^2 + (P_K)^2} \quad (3.13)$$

Para determinar a propagação do erro sistemático e aleatório em cada indicador utiliza-se as equações 3.5 e 3.13. De seguida, mostra-se a metodologia adotada para a determinação da incerteza total dos dois indicadores (ELA e I_{50}) e de I .

No caso do indicador ELA (ver equação 2.15), considera-se que Cd e ΔP e a massa volúmica (ρ) tem um erro associado desprezável. Logo as duas variáveis que introduzem erro neste indicador são K e n . Como o n trata-se do declive da regressão linear, apenas é afetado pela incerteza aleatória como já foi explicado na secção 3.2.4. K é afetado também pelo erro sistemático. Aplicando a equação 3.5 para determinar a incerteza aleatória (P_{ELA}) tem-se que:

$$P_{ELA}^2 = \left[\left(\frac{\partial ELA}{\partial K} U_K \right)^2 + \left(\frac{\partial ELA}{\partial n} U_n \right)^2 \right] \quad (3.14)$$

Para calcular a incerteza sistemática tem-se que:

$$B_{ELA} = \left(\frac{\partial ELA}{\partial K} U_K \right) \quad (3.15)$$

Na equações 3.14 e 3.15, U_K e U_n dizem respeito ao erro estimado obtido pela regressão exponencial da curva característica da TDF. As derivadas parciais de K e n são dadas pelas expressões seguintes:

$$\frac{\partial ELA}{\partial K} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot Cd} \cdot \sqrt{\rho} \cdot \Delta P^{(n-\frac{1}{2})} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial ELA}{\partial n} = \frac{\Delta P^{(n-\frac{1}{2})} \cdot \ln(\Delta P) \cdot \sqrt{\rho} \cdot K}{\sqrt{2} \cdot Cd} \quad (3.17)$$

No caso do indicador I_{50} (ver secção 2.2.3.2), além de k e n o erro na determinação do volume de ar contido na TDF (V) também deve ser considerado. Para determinar o erro total de V utiliza-se novamente a equação 3.5. Desprezou-se o erro aleatório na

medição das dimensões da TDF sendo que o erro na medição de cada dimensão apenas diz respeito ao erro sistemático da fita métrica, igual a metade da menor divisão da escala, ou seja, igual a 0,5 [mm]. O erro total na determinação do volume da TDF é dado pela seguinte equação:

$$\delta_V^2 = [(l \times h \times U_c)^2 + (c \times h \times U_l)^2 + (l \times c \times U_h)^2] \quad (3.18)$$

Na equação 3.18 l , c , h dizem respeito ao comprimento, largura e pé-direito da TDF, respetivamente. Tendo em conta o valor de todas as variáveis a incerteza na determinação do volume de ar contido na TDF é aproximadamente 0,011 m^3 .

Aplicando a equação 3.5 tem-se as incertezas aleatórias e sistemáticas:

$$B_{I_{50}}^2 = \left[\left(\frac{\partial I_{50}}{\partial K} U_K \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{50}}{\partial V} U_V \right)^2 \right] \quad (3.19)$$

$$P_{I_{50}}^2 = \left[\left(\frac{\partial I_{50}}{\partial K} U_K \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{50}}{\partial n} U_n \right)^2 + \left(\frac{\partial I_{50}}{\partial V} U_V \right)^2 \right] \quad (3.20)$$

As derivas parciais presentes nas equações 3.19 e 3.20 são determinadas pelas seguintes expressões:

$$\frac{\partial I_{50}}{\partial K} = \frac{\Delta P^n}{V} \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial I_{50}}{\partial n} = \frac{\Delta P^n \cdot K \cdot \ln(\Delta P)}{V} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial I_{50}}{\partial V} = \frac{K \cdot \Delta P^n}{V^2} \quad (3.23)$$

A incerteza total no valor de I_{50} ($\delta_{I_{50}}$) é determinada através da equação 3.13.

A infiltração média anual (I) é diretamente obtida pelo indicador I_{50} tal que:

$$I = \frac{I_{50}}{N} \quad (3.24)$$

Em que N na equação 3.24 se trata de uma constante cuja incerteza é desconhecida. Sendo assim δ_I pode ser estimado por:

$$\delta_I = \frac{\delta_{I_{50}}}{N} \quad (3.25)$$

Capítulo 4

Apresentação e discussão dos resultados experimentais

No capítulo anterior foram descritos todos os procedimentos experimentais adotados para a realização dos ensaios através do método dos gases traçadores e da porta ventiladora. No presente capítulo apresenta-se e discute-se os resultados experimentais obtidos com os dois métodos.

4.1 Método dos gases traçadores

Após o ensaio de dia 9 de abril (descrito na secção 3.2.3) ocorreu uma avaria na fonte de alimentação do equipamento INNOVA 1312. Começou-se por substituir a fonte de alimentação em questão, contudo, o analisador permaneceu inoperável. Contactou-se o representante da marca em Portugal que fez um orçamento de 40000 euros e informou que seria necessário no mínimo um mês e meio para reparar o analisador. Devido ao orçamento apresentado e tempo de reparação optou-se por não reparar este equipamento. Como foi demonstrado na secção 3.2.3 a utilização do medidor Testo 400 pode levar a erros significativos na determinação da taxa de infiltrações visto que a medição de CO_2 apenas é feita no local em que a sonda deste equipamento se situa. Tratando-se do único equipamento disponível nos laboratórios capaz de medir a concentração de CO_2 com a precisão desejada houve a necessidade de implementar solução construtiva que envolvesse este aparelho e que ao mesmo tempo fosse capaz de "integrar" o volume de ar dentro da TDF. Para tal idealizou-se e construiu-se uma caixa integradora (ver Figura 4.1).

Como se pode observar pela Figura 4.1 implementou-se uma ventoinha na face superior da caixa integradora cuja função é aspirar o ar contido no seu interior. Noutras duas faces fizeram-se dois orifícios: um para conectar a sonda de recolha de ar e o outro para introduzir a sonda de medição no interior da caixa integradora. Deste modo, o ar da casa modelo é aspirado pelas sondas de recolha de ar, introduzido na caixa integradora onde a concentração de CO_2 é medida pela sonda do medidor Testo 400. Após a construção da caixa integradora foram efetuados alguns testes preliminares para verificar a funcionalidade da mesma, tendo sido concluído que esta solução seria viável para monitorizar a evolução de CO_2 durante os ensaios dos gases

traçadores.

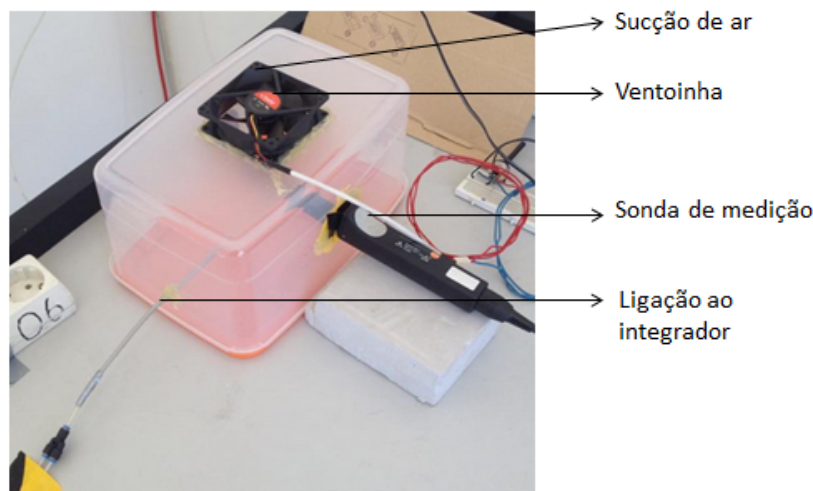


Figura 4.1: Caixa integradora.

Foram efetuados ensaios com oito e quatro pontos de recolha de ar sendo que para cada número de pontos de recolha de ar foram testadas duas configurações espaciais distintas com o intuito de estudar a influência que estas tem na determinação de λ . As quatro configurações espaciais podem ser consultadas no Anexo B.

O primeiro ensaio realizado decorreu durante os dias 18 e 19 de Maio de 2015. A evolução temporal da concentração de CO_2 durante o ensaio em questão pode ser observada na Figura 4.2. O ensaio teve uma duração de 1160 min e a concentração inicial de CO_2 foi de 2260 ppm.

Na Figura 4.2 consegue-se contratar que a evolução temporal de CO_2 antes e depois dos 300 min de ensaio se processa a velocidades consideravelmente diferentes. Uma das hipóteses levantadas para explicar o sucedido foi a presença de várias embalagens de papel e equipamentos eletrónicos no interior da TDF que pudessem interferir com os resultados obtidos. Contudo, mesmo após estes terem sido removido verificou-se o mesmo comportamento da evolução temporal de CO_2 . Verificou-se que desprezando os dados até aos 300 min e considerando apenas os dados a partir desse instante resultaria em resultados próximos dos obtidos no ensaio preliminar. Esta situação verificou-se em todos os ensaios realizados e as diferentes evoluções temporais de gás traçador apresentadas só dizem respeito ao dados obtidos a partir de 300 min de ensaio.

Após a linearização dos dados experimentais através da equação 2.8 obteve-se o gráfico que está presente na Figura 4.4, os técnicos deste ensaio bem como as condições meteorológicas relevantes durante a realização do mesmo encontram-se resumidas nas tabelas 4.1 e 4.2.

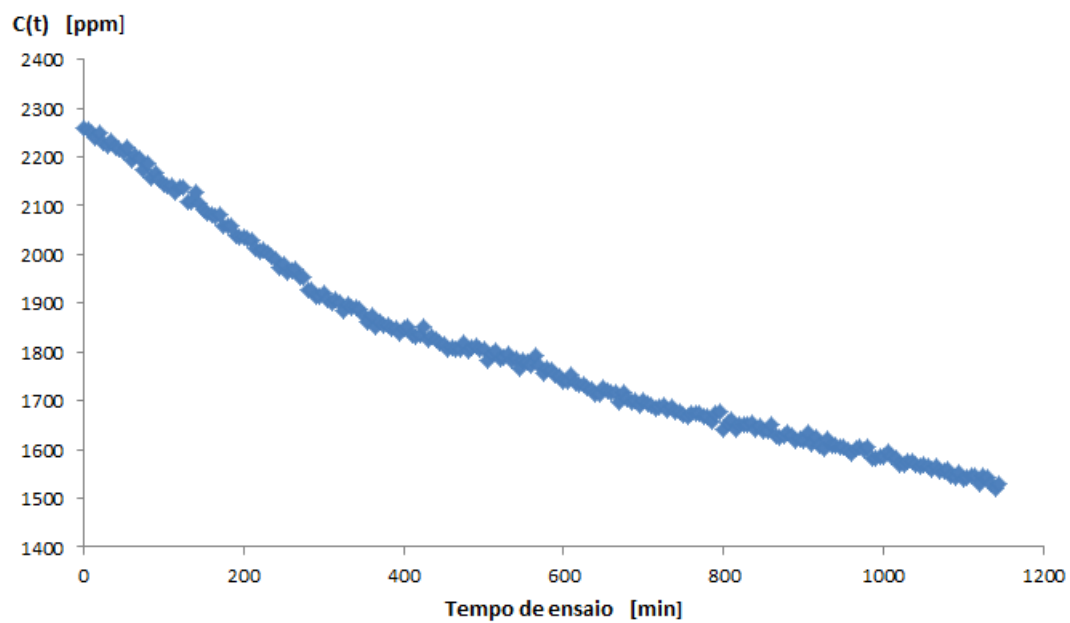


Figura 4.2: Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio A.

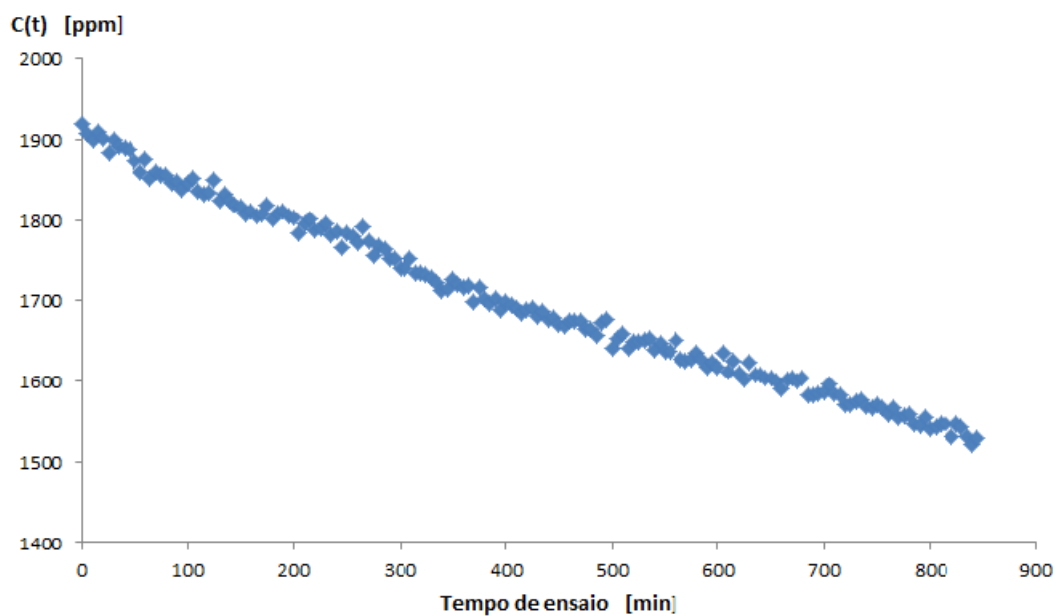


Figura 4.3: Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio A após os 300 min de ensaio.

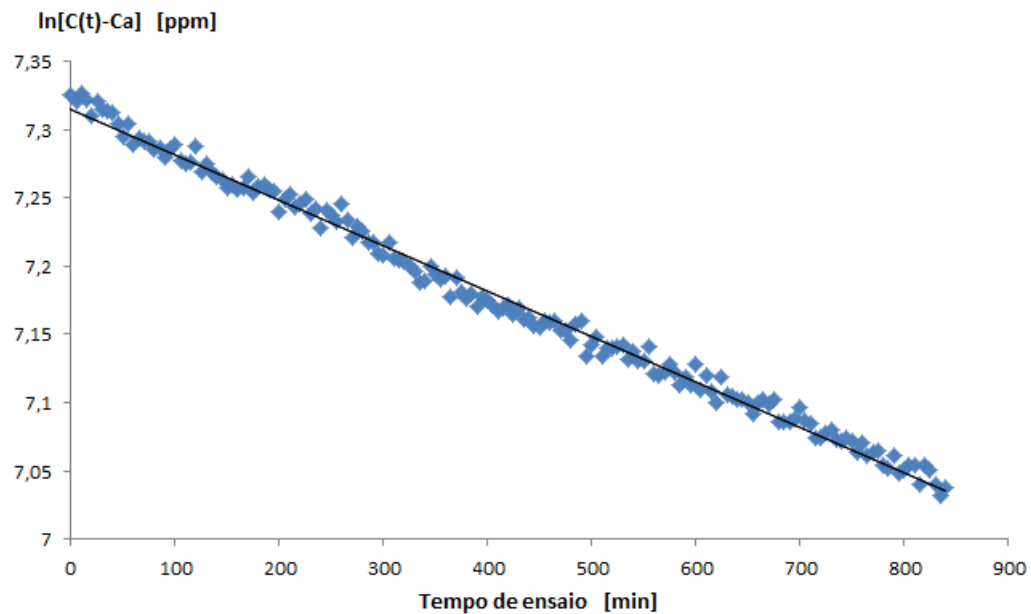


Figura 4.4: Regressão linear aplicada aos dados experimentais referentes ao ensaio A.

Os dados meteorológicos registados durante cada ensaio foram:

- A temperatura exterior (T_{ext}), consultada na estação meteorológica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) [20].
- A velocidade do vento (v_{vento}), também consultada na estação meteorológica do ISEP [20].
- A temperatura do ar no interior da TDF (T_{int}), medida por uma termo-resistência RTD de 4 fios. Este equipamento e a sua localização durante os ensaios foi sempre a mesma e pode ser consultada na Figura 4.6.



Figura 4.5: Termo-resistência RTD de 4 fios utilizado para medir T_{int} durante os ensaios experimentais.

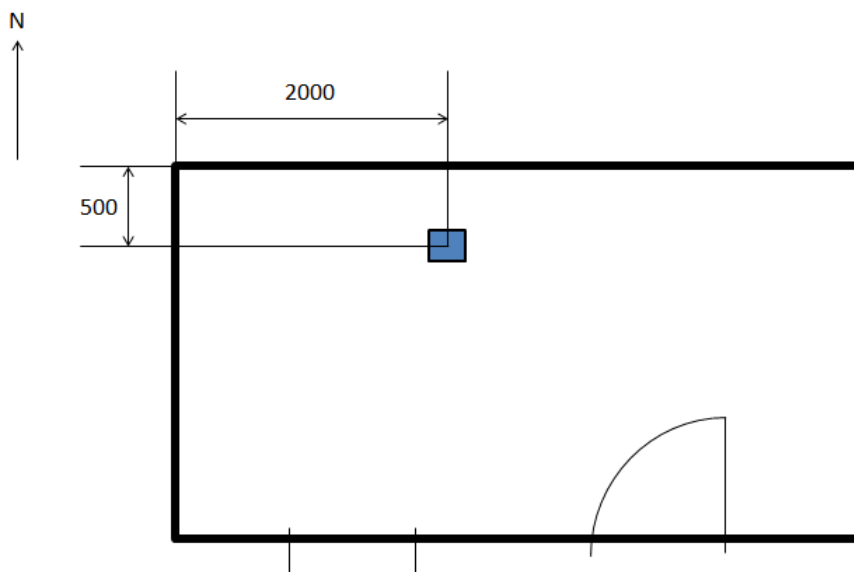


Figura 4.6: Representação esquemática da localização da termo-resistência RTD de 4 fios.

Na Figura D.1 presente no Anexo D pode ser consultada a evolução temporal dos dados meteorológicos durante o ensaio em questão. Como se pode comprovar pela Figura 4.4 a taxa de infiltrações (λ) é igual a $1,99 \cdot 10^{-4} h^{-1}$ valor que difere em 15,3 % do valor determinado no ensaio preliminar.

Nas tabelas 4.1 e 4.2 encontram-se os dados técnicos e condições meteorológicas referentes aos três restantes ensaios. Nas figuras D.2 a D.4 do Anexo D podem ser consultadas a variação das condições meteorológicas durante os três ensaios em questão. Na Tabela 4.3 resume-se o valor de λ determinado nos quatro ensaios, a incerteza absoluta de cada ensaio e as condições meteorológicas durante os ensaios em questão.

Tendo em conta a incerteza estimada para os ensaios A, B e C é possível afirmar que o valor de λ determinado pode ser considerado igual. Apesar das condições meteorológicas terem variado significativamente, por exemplo do ensaio A para o B, o resultado obtido foi igual, o que segundo [14], é um fenómeno recorrente em edifícios com um elevado grau de estanquidade ao ar. Esta hipótese corrobora o sucedido no ensaio preliminar com a porta ventiladora (ver secção 3.3.3) em que a elevada estanquidade da TDF levou a estragos estruturais consideráveis.

As condições meteorológicas durante os dois últimos ensaios (C e D) foram muito aproximadas, contudo, o valor de λ variou 50,5 % sendo que a principal explicação o sucedido está relacionada com a distribuição espacial das sondas de recolha de ar adotadas em cada ensaio. Como já foi referido anteriormente, segundo [9] chegou-se à conclusão que mesmo em volumes de teste pequenos, a distribuição espacial dos pontos de recolha de ar tem uma forte influência nos resultados obtidos. Estas conclusões podem ser observadas também na Tabela 4.3 principalmente quando o número de pontos de recolha diminui.

Tabela 4.1: Dados técnicos durante os ensaios A, B, C e D.

Dados Técnicos	
Ensaio A	
Início	18/05/2015-20:00
Fim	19/05/2015-10:10
Duração – [min]	850
Configuração das sondas de recolha de ar	8C1
Ensaio B	
Início	19/05/2015-20:00
Fim	20/05/2015-09:40
Duração – [min]	800
Configuração das sondas de recolha de ar	8C2
Ensaio C	
Início	20/05/2015-20:05
Fim	21/05/2015-09:45
Duração – [min]	800
Configuração das sondas de recolha de ar	4C1
Ensaio D	
Início	21/05/2015-20:05
Fim	22/05/2015-09:45
Duração – [min]	800
Configuração das sondas de recolha de ar	4C2

Tabela 4.2: Condições meteorológicas técnicos durante os ensaios A, B, C e D.

Dados Meteorológicos			
Ensaio A			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	10,2	19,0	3,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	19,0	25,3	15,8
$T_{ext} [^{\circ}C]$	13,9	16,8	11,9
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	5,1		
Ensaio B			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	9,7	19,0	3,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	20,5	26,4	18,1
$T_{ext} [^{\circ}C]$	13,8	16,8	11,9
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	6,6		
Ensaio C			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	2,9	10,0	0,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	13,7	16,3	12,0
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		
Ensaio D			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	2,9	10,0	0,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	13,7	16,3	12,0
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		

* Ocorreu uma avaria no termómetro e não foi possível medir T_{int}

Tabela 4.3: Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os quatro ensaios.

Determinação da taxa de infiltrações					
Ensaio	Configuração Espacial	Resultados		Condições meteorológicas	
		$\lambda \pm \delta$ [h ⁻¹]	R^2 [%]	ΔT_{med} [°C]	$v_{vento.med}$ [km/h]
A	8C1	$1,99 \times 10^{-2} \pm 2,60 \times 10^{-4}$	99,3	5,1	10,2
B	8C2	$1,89 \times 10^{-2} \pm 6,65 \times 10^{-4}$	95,1	6,6	9,7
C	4C1	$1,86 \times 10^{-2} \pm 6,61 \times 10^{-4}$	95,8	13,7*	2,9
D	4C2	$2,8 \times 10^{-2} \pm 1,02 \times 10^{-3}$	95,1	13,7*	2,9

* Apenas diz respeito a $T_{ext.med}$ pois não foi possível determinar T_{int}

A legislação vigente em Portugal [23] estabelece a taxa de renovação mínima em função do tipo de espaço e de atividade metabólica. Segundo a legislação o caudal de ar novo deverá ser $24 [m^3/(hora \cdot pessoa)]$ no caso de um escritório ocupado oito horas por dia. Visto que se considerou que trabalha uma pessoa na TDF e tendo em conta o volume de ar contido na TDF, conclui-se que a taxa mínima de renovação do ar interior é igual $0,64 h^{-1}$.

Visto que a TDF não possui sistema de climatização a única forma de assegurar a renovação do ar interior é através das infiltrações. A taxa de renovação do ar mínima exigida por lei é muito superior às taxas de infiltrações determinadas nos quatro ensaios realizados. Com o intuito de aumentar a taxa de renovação do ar interior na TDF decidiu-se implementar quatro grelhas de circulação de ar (ver Figura 4.7 a 4.9).

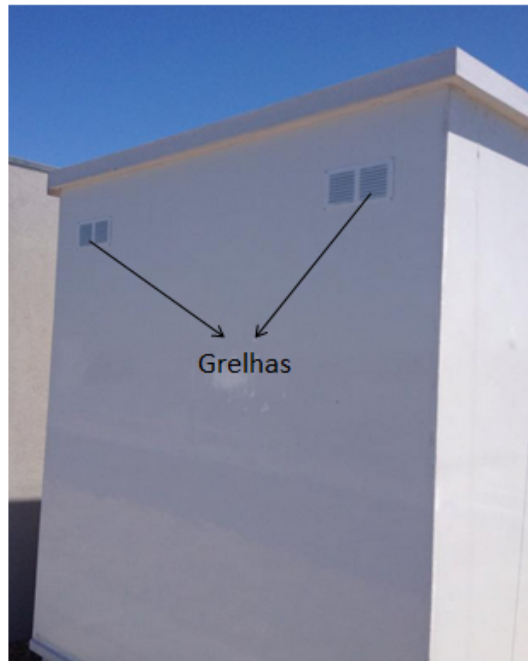


Figura 4.7: Grelhas de circulação de ar instaladas na parede orientada a oeste.



Figura 4.8: Grelha de circulação de ar instalada na parede orientada a sul.

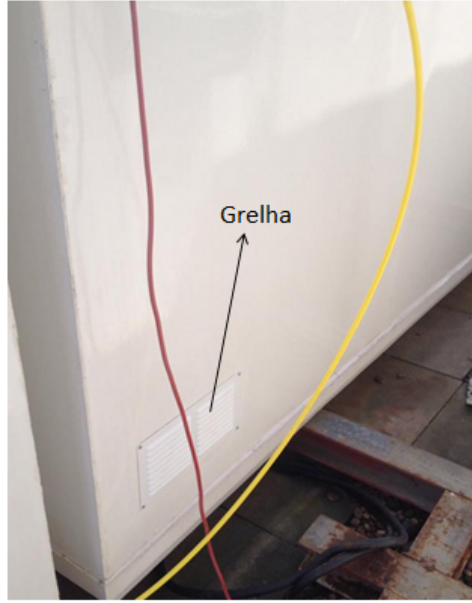


Figura 4.9: Grelha de circulação de ar instalada na parede orientada a norte.

Já com as grelhas instaladas voltou-se a realizar quatro ensaios com o método dos gases traçadores. É importante ter em conta, como foi explicado na secção 3.2.3, os resultados experimentais podem ser interpretados como a taxa de renovação natural do ar (r_n). O primeiro ensaio realizado com as quatro grelhas instaladas decorreu durante o dia 26 de Maio de 2015 (ensaio G) e decidiu-se reduzir o tempo de amostragem para um min porque esperava-se uma maior renovação do ar do que antes da instalação das grelhas.

A evolução temporal da concentração de CO_2 e a respetiva linearização dos dados podem ser observadas nas figuras 4.10 e 4.11. Os dados técnicos e as condições meteorológicas relevantes durante a realização do mesmo encontram-se resumidas nas Tabelas 4.4 e 4.5. O resultado da regressão linear é dado pela equação seguinte:

$$\ln [C(t) - C_a] = -1,32 \cdot 10^{-2}t + 7,27 \quad (4.1)$$

O coeficiente de correlação para a regressão linear foi de 98,1% e como se pode constatar pelo declive da reta apresentada na equação 4.1 a taxa de renovação estimada para este ensaio foi de $0,79 \text{ h}^{-1}$ o que indica que todo ar contido na TDF é renovado em 1,3 horas. A duração do ensaio foi de 136 minutos.

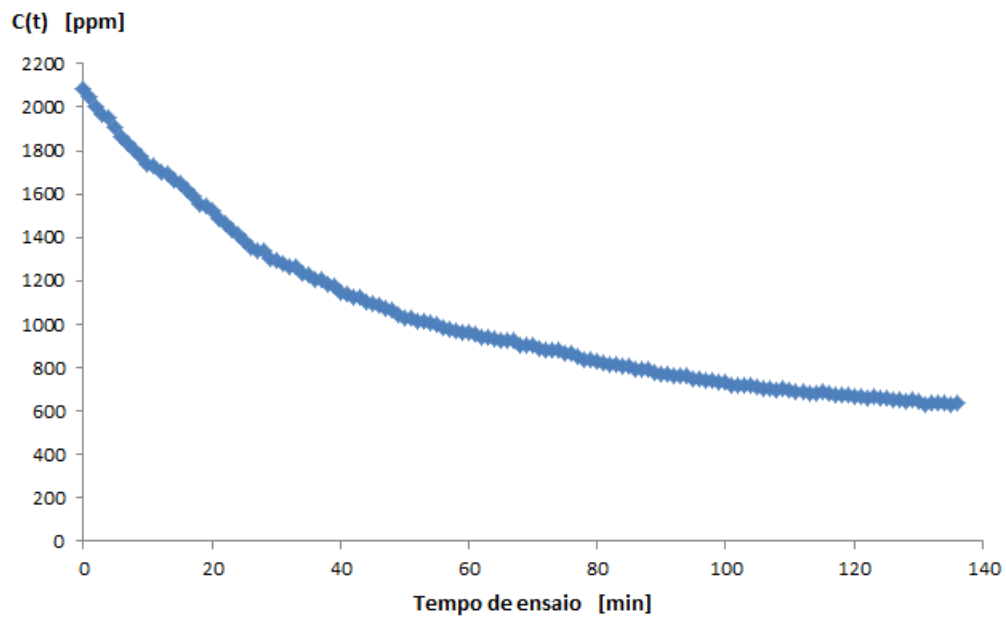


Figura 4.10: Evolução da concentração de CO_2 durante o ensaio G.

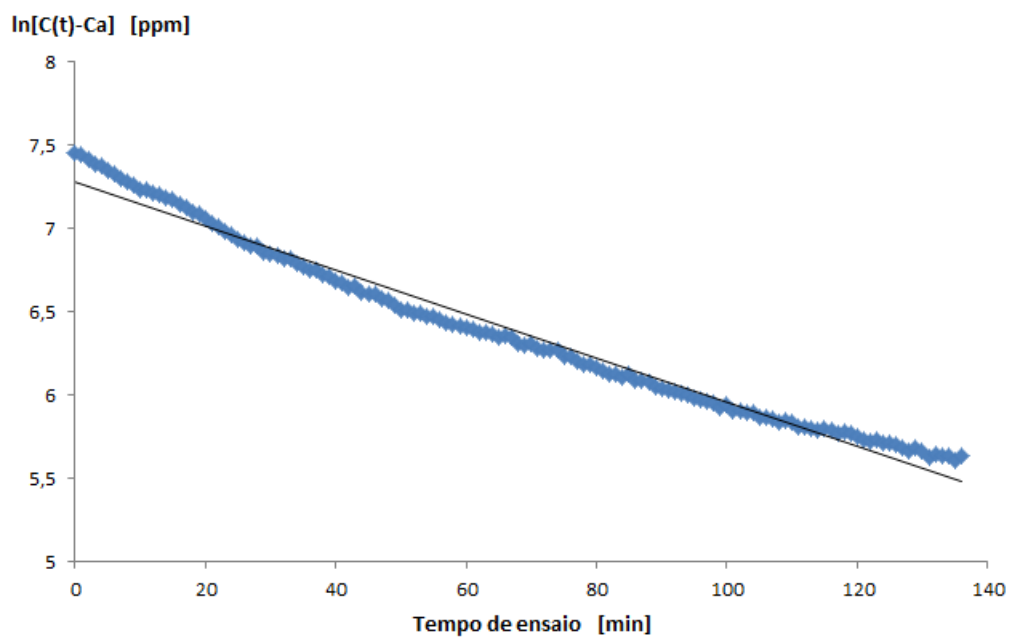


Figura 4.11: Regressão linear aplicada aos dados experimentais referentes ao ensaio G.

Nas tabelas 4.4 e 4.5 encontram-se os dados técnicos e condições meteorológicas referentes aos três restantes ensaios. No Anexo D nas figuras D.7 a D.5 podem ser consultadas as evoluções de T_{ext} e v_{vento} durante os 4 ensaios (durante estes 4 ensaios não foi possível medir T_{int} devido á avaria da termo-resistência RTD de quatro fios).

Na Tabela 4.6 faz-se um resumo de todos os resultados obtidos bem como das condições meteorológicas registadas durante os quatro ensaios após a instalação das grelhas de circulação de ar.

Começando por analisar os dois ensaios com oito pontos de recolha de ar, verifica-se que as condições climáticas têm influência nos resultados obtidos, pois mesmo tendo em consideração as incertezas na determinação de r_n , pode-se constatar pela Tabela 4.6 que houve um decréscimo de 22,7 % de r_n com o aumento de $T_{ext_{med}}$ e $vel_{vento_{med}}$. Este decréscimo não está de acordo ao que foi concluído por Ghazi et al em [6], contudo, Cui et al com o trabalho levado a cabo em [9] concluiu que quanto menor for a estanquidade de uma envolvente, mais a taxa de infiltrações/renovação do ar se encontra dependente das condições meteorológicas.

Passando a analisar os dois ensaios realizados com quatro pontos de recolha de ar, constata-se que ocorreu um acréscimo de 98,7% em r_n com o aumento de $T_{ext_{med}}$ e $vel_{vento_{med}}$ o que corrobora as conclusões de Ghazi et al e Cui et al com o estudo levado a cabo em [6] e em [9].

No que toca á qualidade dos resultados obtidos pode-se estabelecer uma relação inversa entre o coeficiente de relação (R^2) e a incerteza cometida na determinação da taxa de infiltrações. A maior incerteza cometida na determinação de r_n verificou-se no ensaio H e foi de $\pm 0,021 \text{ h}^{-1}$ tendo sido também neste ensaio que se registou um menor R^2 98,2%. Por outro lado o ensaio F teve a menor incerteza ($\pm 0,0085 \text{ h}^{-1}$) e o maior R^2 99,6%.

Tabela 4.4: Dados técnicos referentes ao ensaios E, F, G e H.

Dados Técnicos	
Ensaio E	
Início	28/05/2015-08:30
Fim	28/05/2015-11.16
Duração – [min]	141
Configuração das sondas de recolha de ar	8C1
Ensaio F	
Início	27/05/2015-14:00
Fim	27/05/2015-15:35
Duração – [min]	95
Configuração das sondas de recolha de ar	8C2
Ensaio G	
Início	26/05/2015-18:14
Fim	26/05/2015-20:30
Duração – [min]	136
Configuração das sondas de recolha de ar	4C1
Ensaio H	
Início	28/05/2015-12:00
Fim	28/05/2015-13:54
Duração – [min]	114
Configuração das sondas de recolha de ar	4C2

Tabela 4.5: Condições meteorológicas durante os ensaios E, F, G e H.

Dados Meteorológicos			
Ensaio E			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	2,4	3,0	0,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	26,8	28,7	25,1
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		
Ensaio F			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	4,7	10,0	2,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	28,3	29,1	27,3
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		
Ensaio G			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	2,7	6,0	0,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	25,5	26,0	24,6
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		
Ensaio H			
	Média	Máximo/a	Mínimo/a
$v_{vento} [km/h]$	7,0	10,0	5,0
$T_{int} [^{\circ}C]$	*	*	*
$T_{ext} [^{\circ}C]$	28,1	28,3	27,3
$\Delta T_{med} [^{\circ}C]$	*		

* Ocorreu uma avaria no termómetro e não foi possível medir T_{int}

Tabela 4.6: Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os ensaios E, F, G e H.

Determinação da taxa de renovação natural do ar					
Ensaio	Configuração Espacial	Resultados		Condições meteorológicas	
		$r_n \pm \delta$ [h^{-1}]	R^2 [%]	$T_{ext.med}$ [°C]	$v_{vento.med}$ [km/h]
E	8C1	$0,90 \pm 0,019$	98,7	26,8	2,4
F	8C2	$0,695 \pm 0,0085$	99,6	28,3	4,7
G	4C1	$0,79 \pm 0,020$	98,1	25,5	2,7
H	4C2	$1,57 \pm 0,021$	98,2	28,1	7,0

Para concluir a apresentação e discussão dos resultados obtidos resume-se na Tabela 4.7 todos os resultados obtidos (antes e depois da instalação das grelhas de circulação de ar).

A média dos resultados obtidos antes da instalação de grelhas de circulação de ar é igual a $2,13 \times 10^{-2} h^{-1}$, enquanto que da taxa de renovação determinada média após a instalação das grelhas é de $0,99 h^{-1}$. Verifica-se que após a instalação de grelhas o ar interior da TDF demora praticamente um hora a ser renovado, enquanto que antes da instalação das grelhas o ar interior demora em média praticamente 47 horas a ser renovado.

Quando se compara os resultados obtidos antes e após a instalação das grelhas de circulação de ar a principal diferença que se consegue constatar é que taxa de renovação do ar após a instalação das grelhas varia consoante as condições climatéricas, por outro lado, antes da instalação das grelhas a taxa de infiltrações mantém-se constante independentemente das condições climatéricas registadas (expeto no ultimo ensaio pelas razões já explicadas).

Nos oito ensaios realizados verifica-se que a recolha de ar com oito sondas leva a resultados experimentais com maiores coeficientes de relação e com menores incertezas, o que indica que para este número de pontos de recolha de ar é feita uma melhor integração do volume de ar contido na TDF e melhor este espaço de teste se aproxima do conceito de zona perfeita (ver secção 2.1.2). Analisando a influência da

taxa de infiltrações/renovação de ar na qualidade dos resultados constata-se que os resultados após a instalação das grelhas tem uma menor incerteza e um maior R^2 . A incerta relativa média dos ensaios antes e depois da instalação das grelhas de ar foram 3,0 e 1,8, respetivamente. Daqui conclui-se que maiores taxas de renovação de ar levam a menores incertezas relativas nos resultados experimentais.

Tabela 4.7: Resumo dos resultados obtidos e condições meteorológicas durante os oito ensaios.

Resumo de todos os resultados obtidos						
Ensaio	Configuração Espacial	Resultados			Condições meteorológicas	
		λ / r_n [h ⁻¹]	Incerteza Relativa [%]	R^2 [%]	ΔT_{med} [°C]	$v_{vento.med}$ [km/h]
A	8C1	$1,99 \times 10^{-2}$	$\pm 1,31$	99,3	5,1	10,2
B	8C2	$1,89 \times 10^{-2}$	$\pm 3,52$	95,1	6,6	9,7
C	4C1	$1,86 \times 10^{-2}$	$\pm 3,55$	95,8	13,7*	2,9
D	4C2	$2,8 \times 10^{-2}$	$\pm 3,64$	95,1	13,7*	2,9
E	8C1	0,90	$\pm 2,11$	98,7	26,8*	2,4
F	8C2	0,695	$\pm 1,22$	99,6	28,3*	4,7
G	4C1	0,79	$\pm 2,53$	98,1	25,5*	2,7
H	4C2	1,57	$\pm 1,34$	98,2	28,1*	7,0

*Apenas diz respeito a $T_{ext.med}$ Pois não foi possível determinar T_{int}

4.2 Porta Ventiladora

Foram realizados dois ensaios com a porta ventiladora após a instalação das grelhas, ambos no dia 2 de Junho de 2015. Os resultados referentes ao primeiro e segundo ensaio encontram-se nas tabelas 4.8 e 4.9. A duração dos dois ensaios foi de 30 min.

Tabela 4.8: Resultados obtidos no ensaio primeiro com a porta ventiladora.

Ensaio 1- Porta Ventiladora					
Ensaio de pressurização			Ensaio de despressurização		
ΔP_{IN-EXT} [Pa]	ΔP_{VENT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	ΔP_{EXT-IN} [Pa]	ΔP_{VENT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]
10	10	0,16	10	12,5	0,18
20	22,5	0,23	20	25	0,25
30	32,5	0,28	32	37,5	0,30
42	45	0,33	42	47,5	0,33
52	57,5	0,37	50	57,5	0,37
60	65	0,39	60	67,5	0,40

Tabela 4.9: Resultados obtidos com o segundo ensaio com a porta ventiladora.

Ensaio 2- Porta Ventiladora					
Ensaio de pressurização			Ensaio de despressurização		
ΔP_{IN-EXT} [Pa]	ΔP_{VENT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	ΔP_{EXT-IN} [Pa]	ΔP_{VENT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]
10	10	0,16	10	12,5	0,18
20	22,5	0,23	20	25	0,25
30	32,5	0,28	32	37,5	0,30
42	45	0,33	42	50	0,34
52	55	0,36	52	60	0,38
60	65	0,39	60	67,5	0,40

Como já foi explicado na secção 3.3.1, o valor do caudal volúmico de ar deslocado pelo ventilador (\dot{V}_{med}) é determinado através das curvas características do mesmo medindo a variação de pressão no ventilador (ΔP_{VENT}). Visto que não se obteve nenhum dos furos do ventilador, a curva utilizada é a seguinte [22]:

$$\dot{V}_{med} = 0,046 * (\Delta P_{VENT})^{0,486} \quad (4.2)$$

Na equação 4.2 a variável ΔP_{VENT} deve ser substituída em Pa e \dot{V}_{med} vem expresso em m^3/s . Contudo, o valor deste caudal deve ser corrigido aplicando a equação 2.10 obtendo-se \dot{V}_{corr} (valor presente nas tabelas 4.8 ??). Os valores médios durante o ensaio de T_{ext} e P_{ext} foram consultados em [20], enquanto que o valor de T_{int} foi medido pela termoresistência RTD de 4 fios presente no interior da TDF. O valor médio destas três variáveis durante os dois ensaios está presente na Tabela 4.10. No manual do ventilador [22] está presente a informação que a temperatura a que foi calibrado (T_0) foi de $25^\circ C$.

Tabela 4.10: Dados meteorológicos durante os ensaios da porta ventiladora.

Ensaio porta ventiladora	
Início	02/06/2015-16.30
Fim	02/06/2015-17:05
Duração – [min]	35
Dados Meteorológicos	
	Média
P_{ext} - [kPa]	101,9
T_{int} - [$^\circ C$]	25,6
T_{ext} - [$^\circ C$]	19,9

Pode-se verificar pelas tabelas 4.8 e 4.9 que o caudal de ar deslocado numa situação de despressurização é superior à situação da pressurização o que pode ser explicado pela natureza dos vedantes da porta e da janela que vedam com uma maior eficácia em situações de pressurização. Para visualizar os resultados obtidos apresenta-se as quatro curvas \dot{V}_{corr} em função de ΔP na Figura 4.12.

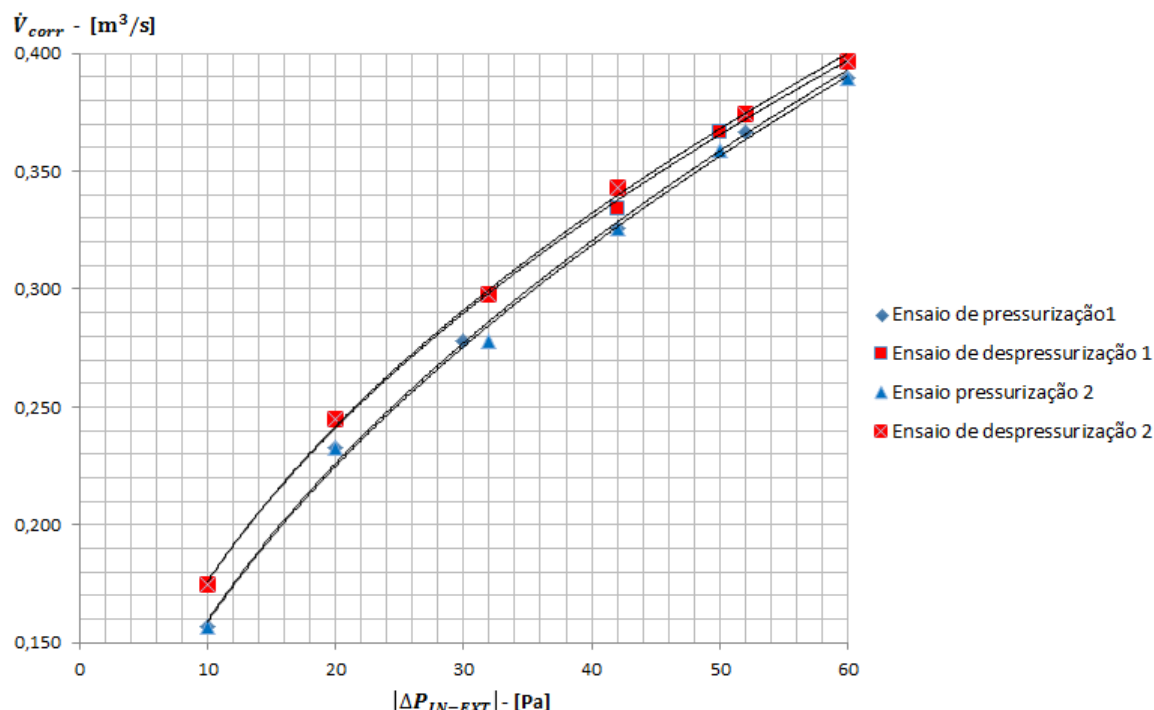


Figura 4.12: Curvas de pressurização e despressurização referentes aos dois ensaios.

Analisando as quatro curvas obtidas na Figura 4.12 pode-se afirmar que existe uma repetibilidade dos resultados obtidos entre os dois ensaios realizados com a porta ventiladora. Como o principal objetivo deste método é mediar a estanquidade ao ar de uma determinada envolvente, característica constante no tempo (ver secção 2.2.1), faz todo o sentido que os resultados obtidos nos dois ensaios possam ser considerados iguais. As curvas de pressurização e despressurização do primeiro ensaio são as seguintes respetivamente:

$$V_{corr} = 0,051 \cdot (\Delta P)^{0,053} \quad (4.3)$$

$$V_{corr} = 0,062 \cdot (\Delta P)^{0,454} \quad (4.4)$$

Os coeficientes de correlação para os ajustamentos exponenciais das equações 4.3 e 4.4 são 99,8% e 99,9%, respetivamente. As curvas de pressurização e despressurização do segundo ensaio são as seguintes respetivamente:

$$V_{corr} = 0,050 \cdot (\Delta P)^{0,502} \quad (4.5)$$

$$V_{corr} = 0,613 \cdot (\Delta P)^{0,458} \quad (4.6)$$

Os coeficientes de correlação para os ajustamentos exponenciais das equações 4.5 e 4.6 são 99,6% e 99,9%, respetivamente. A curva característica da casa modelo é obtida com os caudais médios dos dois ensaios para os mesmos valores de ΔP . Na Tabela 4.11 encontram-se os valores médios de V_{corr} . Os casos assinalados com (*) foram determinados recorrendo às equações de pressurização e despressurização. A

curva média dos dois ensaios é apresentada na Figura 4.13.

Tabela 4.11: Procedimento de cálculo da curva média.

Cálculo da curva média								
Ensaio de pressurização 1		Ensaio de despressurização 1		Ensaio de pressurização 2		Ensaio de despressurização 2		Média
ΔP_{IN-EXT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	ΔP_{EXT-IN} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	ΔP_{IN-EXT} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	ΔP_{EXT-IN} [Pa]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]	\dot{V}_{corr} [m ³ /s]
10	0,16	10	0,18	10	0,14	10	0,15	0,17
20	0,23	20	0,25	20	0,20	20	0,21	0,24
30	0,27*	30	0,29**	30	0,24*	30	0,25**	0,28
32	0,28	32	0,30	32	0,25	32	0,26	0,29
42	0,33	42	0,34	42	0,28	42	0,29	0,33
50	0,36	50	0,37**	50	0,31	50	0,32**	0,36
52	0,36*	52	0,38	52	0,31*	52	0,32	0,37
60	0,39	60	0,40	60	0,33	60	0,34	0,39

*Valores obtidos pela equação da curva característica de pressurização

**Valores obtidos pela equação da curva característica de despressurização

Ajustando a equação 2.9 aos valores médios de V_{corr} em função de ΔP obtém-se a seguinte equação:

$$V_{corr} = 0,056 \cdot (\Delta P)^{0,479} \quad (4.7)$$

O indicador ELA foi determinado recorrendo á equação 2.15 em que $Cd = 1$, $\Delta P = 4Pa$ e a massa volúmica do ar é igual a $1,2 [Kg/m^3]$ (ver secção 2.2.3.1). Utilizando os coeficientes n e K da equação 4.7 , estima-se que $ELA = 0,0419 m^2$. Sabendo que a área da envolvente da TDF é igual a $48,39 m^2$ conclui-se que apenas 0,087 % desta área troca ar com o exterior. É também relevante comparar o valor de ELA com a área das grelhas instaladas. Cada grelha possui uma secção livre de $147 cm^2$ o que no total resulta numa área de $584 cm^2$, comparando este valor com o indicador ELA, estima-se que 71,7 % da secção livre da grelha efetivamente troca ar com o exterior.

O valor de I_{50} é calculado segundo a seguinte equação:

$$I_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \quad (4.8)$$

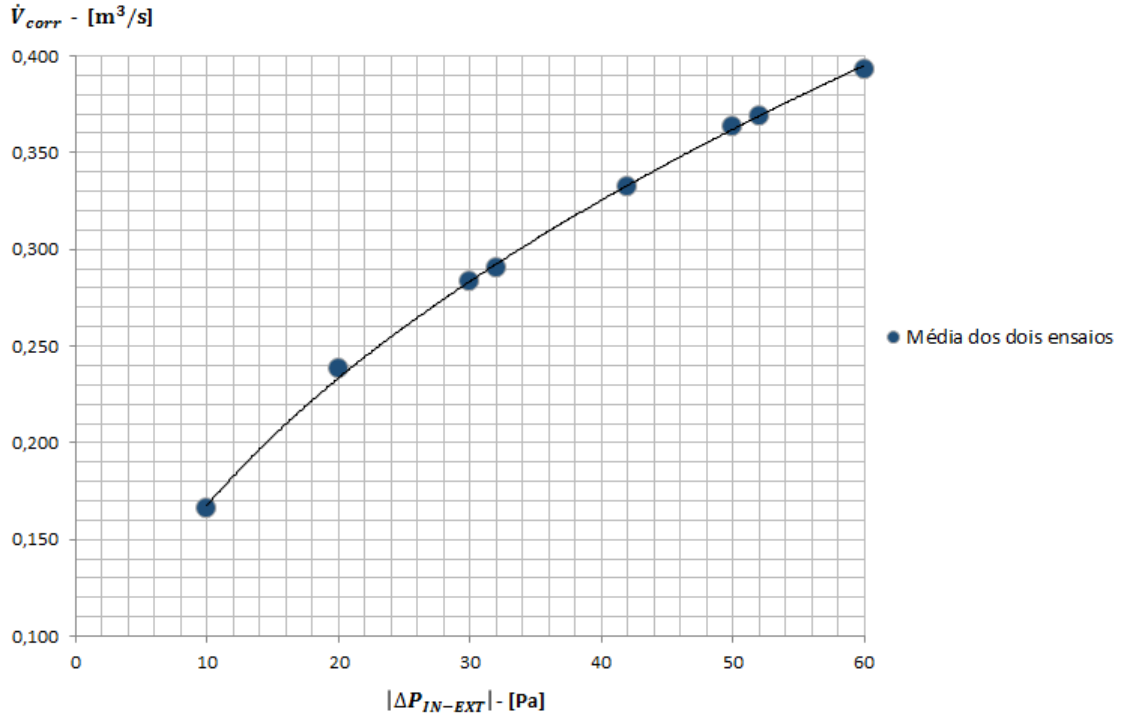


Figura 4.13: Curva média dos dois ensaios.

Na equação 4.8, V diz respeito ao volume de ar contido na sala e o valor de \dot{V}_{50} é determinado através da equação da curva característica da TDF substituindo ΔP por 50 Pa . Substituindo o valor das duas variáveis conclui-se que o valor de I_{50} é igual a $34,74 \text{ h}^{-1}$.

Na secção 2.2.4 foi apresentado o modelo empírico de Sherman cujo objetivo é correlacionar os resultados obtidos pelo ensaio da porta ventiladora com o nível médio anual das infiltrações (I) tendo este proposto que o nível médio de infiltrações de uma habitação é dado por:

$$I = I_{50}/N \quad (4.9)$$

O valor da variável N tem em conta alguns fatores, como por exemplo a altura da habitação, o vento e a proteção da fachada ao vento. O seu valor é definido pela seguinte equação [11]:

$$N = C * J * K * O \quad (4.10)$$

Na equação 4.10, C diz respeito à zona climática dos E.U.A onde o edifício se encontra construído (ver Figura 4.14), J trata-se de um fator relacionado com a altura da habitação (ver Tabela 4.12), K diz respeito à proteção ao vento do edifício em questão (ver Tabela 4.13) e O trata-se de um fator relacionado com as fendas existentes (ver Tabela 4.14).



Figura 4.14: Valores do fator climático (C) nos estados E.U.A,(Adaptado de[11]).

Tabela 4.12: Valores do fator de correção de altura (J) [11].

Nº de Pisos	1	1,5	2	3
Factor de correção da altura (J)	1,0	0,9	0,8	0,7

Tabela 4.13: Valores do fator de correção da proteção ao vento (K) [11].

Proteção ao vento	Alta	Normal	Exposta
Factor de correção da protecção ao vento (K)	1,2	1,0	0,9

Tabela 4.14: Valores do fator de correção do tamanho das fendas (O) [11].

Tamanho das fendas	Pequenas	Normais	Grandes
Factor de correção do tamanho das fendas (O)	1,4	1,0	0,7

Como a metodologia de Sherman para prever a taxa de infiltrações média apenas é válida para edifícios nos E.U.A optou-se por fazer a previsão através uma relação mais simples muitas vezes utilizada por investigadores na Europa [13]:

$$I = I_{50}/20 \quad (4.11)$$

A relação entre I e I_{50} apresentada em 4.11 foi o resultado de uma investigação levada a cabo nos anos oitenta por Kronvall e Persily [13], em que foram comparados valores de I_{50} obtidos na Suécia e nos E.U.A. Tendo em conta esta relação o valor

de I para a TDF é aproximadamente $1,743 \text{ h}^{-1}$.

Para concluir apresenta-se a Tabela 4.15 que resume os resultados obtidos com a porta ventiladora.

Tabela 4.15: Resumo dos resultados obtidos com os dois ensaios da porta ventiladora.

Resumo dos resultados obtidos	
Equação da curva média $\dot{V}_{corr} = K \cdot (\Delta P)^n$	$\dot{V}_{corr} = 0,056 \cdot (\Delta P)^{0,479}$
ELA – [m^2]	$0,042 \pm 0,001$
I_{50} – [h^{-1}]	$34,74 \pm 0,06$
I – [h^{-1}]	$1,743 \pm 0,003$

Na Tabela 4.15 é possível consular as incertezas associadas á determinação dos dois indicadores e de I . A maior incerta estimada está associada ao I_{50} pois além das incertezas de k e n (ver secção 3.3.4) a incerteza deste indicador é também afetada pela incerteza da determinação do volume dar ar contido na TDF.

4.3 Comparação dos resultados obtidos

Os resultados obtidos pelo método dos gases traçadores e pelo método da porta ventiladora só podem ser comparados após a instalação das grelhas de circulação de ar visto que não foi possível obter resultados experimentais pela porta ventiladora antes da instalação das mesmas (ver secção 3.3.3). Como já foi referido anteriormente, com a instalação das grelhas de circulação de ar, não se determina a taxa de infiltrações (λ) da TDF mas sim a taxa de renovação natural do ar (r_n), situação que se verifica nos dois ensaios realizados. Os resultados obtidos com os dois ensaios não podem ser comprados diretamente, uma vez que através ensaio da porta ventiladora estima-se a taxa anual média de infiltrações (neste caso renovação natural do ar) e não a a taxa de renovação natural do ar (r_n) para um determinado período como sucede no ensaio dos gases traçadores. Com o intuito de comparar os resultados obtidos pelos dois métodos calculou-se a média dos r_n determinados sendo igual a $0,99 \text{ h}^{-1}$. O I estimado pelo ensaio da porta ventiladora foi de $1,743 \text{ h}^{-1}$, valor bastante diferente do obtido pelo método dos gases traçadores. A diferença verificada pode ser explicada pelos seguintes razões:

- A correlação utilizada para fazer a previsão de I não tem em conta as condições climáticas, nomeadamente a diferença entre a temperatura interior e exterior e velocidade do vento.

- Durante a realização do ensaio com a porta ventiladora a velocidade média do vento foi igual a 4 km/h , o que pode ter influenciado os resultados obtidos por este ensaio [20].
- Para estimar a taxa de renovação natural do ar pelos gases traçadores apenas se utilizou quatro ensaios, numero manifestamente insuficiente quando se pretende fazer uma estimativa anual.

Capítulo 5

Conclusões e trabalhos futuros

As infiltrações de ar têm influência na QAI, conforto térmico e ainda no consumo energético dos edifícios. A determinação analítica da taxa de infiltrações de ar é bastante complexa e na maioria dos casos impossível, como tal, desenvolveram-se várias metodologias experimentais para estudar os fluxos não controlados de ar nos edifícios. Os ensaios mais utilizados para o estudo das infiltrações de ar são o gases traçadores e o porta ventiladora. Nesta dissertação aplicou-se estes dois ensaios a uma casa modelo com arrefecimento térmico solar térmico.

No caso dos ensaios com os gases traçadores há uma série de variáveis a definir antes da realização dos mesmos. Para fazer um estudo destas variáveis e testar todos os equipamentos envolvidos neste ensaio realizaram-se três ensaios preliminares sendo que as conclusões tiradas são as seguintes:

- O valor mais adequado para o tempo de amostragem (T_a) é de 5 min.
- Tendo em conta o valor determinado de λ o tempo mínimo de ensaio deverá ser de 42,5 h.
- Os resultados experimentais são fortemente afetados pela localização da sonda de medição de CO_2 (medidor Testo 400) consequentemente a medição da concentração CO_2 tem de ser feita em vários pontos da TDF
- O valor de C_0 adotado (1930 ppm) é suficiente para a correta determinação de λ

Após a realização dos ensaios preliminares começou-se a implementar o ensaio dos gases traçadores na TDF tendo em conta as conclusões apresentadas anteriormente. Com base nos resultados experimentais obtidos por este método as conclusões principais são as seguintes:

- Antes da instalação das grelhas de circulação de ar o valor de λ determinado foi praticamente independente das condições meteorológicas. Por outro lado, após a instalação das grelhas consegue-se verificar que o valor de λ é influenciado pelas condições meteorológicas. Daqui pode-se concluir que ao diminuir a estanquidade da TDF, as condições meteorológicas passam a ter influência na taxa de infiltrações/renovação do ar.

- A configuração espacial das sondas de recolha de ar tem uma influência importante nos resultados experimentais.
- Quanto maior for o número de pontos de recolha de ar melhor os resultados obtidos se ajustam ao modelo matemático desenvolvido e menores são as incertezas experimentais. Verifica-se também que quanto maior for a taxa de infiltrações/renovação da ar, os resultados experimentais tendem a possuir uma melhor qualidade.
- A média dos resultados antes e depois da instalação das grelhas foi de $2,13 \times 10^{-2} h^{-1}$ e $0,99 h^{-1}$ podendo-se concluir que a renovação mínima exigida por lei ($0,64 h^{-1}$) só é garantida com a instalação das grelhas de circulação de ar.

O ensaio com a porta ventiladora é mais simples do ponto de vista conceptual e experimental quando comparando com o ensaio dos gases traçadores. O ensaio preliminar que se realizou com este ensaio teve unicamente o objetivo de testar o equipamento utilizado, contudo, não foi possível tirar conclusões deste ensaio visto que ocorreram danos estruturais na TDF durante a realização do mesmo. Após a instalação das grelhas de circulação de ar voltou realizar-se dois ensaios com a porta ventilador. As conclusões que se podem tirar dos ensaios são:

- A TDF é menos estanque no sentido da despressurização do que no sentido da pressurização. Este facto pode ser explicado devido à natureza da vedação presente na janela e na porta da TDF e também com o próprio design das grelhas de circulação de ar.
- A média dos resultados obtidos nos dois ensaios indica que $ELA = 0,042 m^2$. Tendo em conta a área da envolvente da TDF conclui-se que apenas 0,0866 % desta área troca ar com o exterior. Comparando o valor de ELA com a área das grelhas instaladas chega-se à conclusão que 71,7 % da secção livre da grelha efetivamente troca ar com o exterior. O valor médio de I_{50} foi $34,7 h^{-1}$ e a previsão do nível médio de infiltrações (I) estimado foi de $1,743 h^{-1}$.

A diferença entre o valor de I e r_n é aproximadamente igual a 100% e a principal razão para esta diferença prende-se com o facto da correlação utilizada para estimar o I não ter em consideração as condições meteorológicas nem as propriedades da TDF.

Com base no trabalho elaborado e as conclusões principais sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Realizar ensaios com o método dos gases traçadores e com a porta ventiladora durante a estação de aquecimento com o intuito de verificar se a estação do ano tem influência nos resultados obtidos.
- Tentar perceber o porquê da evolução temporal da concentração de CO_2 nos ensaios realizados antes da instalação das grelhas de circulação de ar apresentar duas regiões distintas. Esta questão poderia eventualmente ser respondida ao realizar o ensaio dos gases traçadores num espaço com uma taxa de infiltrações/renovação de ar entre os valores determinados antes e após a instalação das grelhas.

- Segundo o estudo levado em [9] o valor de C_0 tem uma influência significativa nos resultados experimentais no método dos gases traçadores. Seria interessante fazer um estudo semelhante sendo necessário repetir todos os ensaios nos quais fosse introduzido uma quantidade diferente de CO_2 à introduzida nos ensaios deste trabalho (100g).
- Tentar estabelecer uma correlação que permitisse relacionar os resultados do teste da porta ventiladora com o valor da taxa de infiltrações. Em [1] é desenvolvida uma correlação que permite calcular o valor da taxa de infiltrações para determinadas condições meteorológicas ΔT e v_{vento} em função do indicador I_{50} . Ao estabelecer uma correlação do género para a TDF conseguiu-se fazer um balanço térmico mais detalhado da sua envolvente e a ao mesmo tempo prever alturas em que a renovação do ar interior fosse excessiva ou insuficiente.

Bibliografia

- [1] P. Reviewed and L. Berkeley. Review of Airflow Measurement Techniques Jennifer McWilliams Energy Performance of Buildings Group Environmental Energy Technologies Division Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley , CA 94720. *Pulse*, 2002.
- [2] Ashrae. *Indoor Air Quality Guide - Best Practices for Design, Construction, and Commissioning*. 2009.
- [3] Clito Afonso. *Uma metodologia para a determinação de fluxos de ar multizona em edifícios*. PhD thesis, Universidade do Porto, 1989.
- [4] Cristina Maria Costa. Estudo da Qualidade do Ar Interior num edifício da Universidade de Coimbra. Master’s thesis, Universidade de Coimbra, 2011.
- [5] José Luís Alexandre and Eduardo Maldonado. Apontamentos térmica de edifícios, 2014.
- [6] C.J. Ghazi and J.S. Marshall. A CO₂ tracer-gas method for local air leakage detection and characterization. *Flow Measurement and Instrumentation*, 38:72–81, 2014.
- [7] Min Hwi Kim, Jae Hun Jo, and Jae Weon Jeong. Feasibility of building envelope air leakage measurement using combination of air-handler and blower door. *Energy and Buildings*, 62:436–441, 2013.
- [8] Mazyar Amin, Dana Dabiri, and Homayun K. Navaz. Tracer gas technique: A new approach for steady state infiltration rate measurement of open refrigerated display cases. *Journal of Food Engineering*, 92(2):172–181, 2009.
- [9] Shuqing Cui, Michaël Cohen, Pascal Stabat, and Dominique Marchio. CO₂ tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. *Building and Environment*, 84:162–169, 2015.
- [10] Astm E 741. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. 00(Reapproved 2006):17, 2006.
- [11] Alexandre Machado. Aplicação do ensaio da porta ventiladora à avaliação da estanquidade ao ar de edifícios de habitação. Master’s thesis, Universidade do Porto, 2013.

- [12] F.J. Baptista, B.J. Bailey, J.M. Randall, and J.F. Meneses. Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72:363–374, 1999.
- [13] D’Ambrosio F R Alfano, M. Dell’Isola, G. Ficco, and F. Tassini. Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method. *Building and Environment*, 53:16–25, 2012.
- [14] Max Sherman and Larry Palmiter. Uncertainties in Fan Pressurization Measurements. *ASTM: Airflow Performance Conference*, page 21, 1995.
- [15] António Rocha. Desenvolvimento e construção de uma casa modelo com arrefecimento solar térmico. Master’s thesis, Universidade do Porto, 2015.
- [16] N2build. General Description - n2build Building System, 2010.
- [17] CLIMASTOCK. Balanza digital TST 12005 catálogo, 2010.
- [18] Innova. 1312 Photoacoustic Multi-gas User Manual, 1997.
- [19] Testo. V2.02 testo 400 Instructional Manual, 1999.
- [20] ISEP. Meteorologia no Instituto Superior de Engenharia do Porto. URL: <http://http://meteo.isep.ipp.pt/weather/index.html>, acedido em:02/06/2015.
- [21] Paulo Coelho. Apontamentos de Laboratórios de Fluidos e Calor, 2014.
- [22] Minneapolis Blower Door. Blower door A0292 operating instructions, 1986.
- [23] Ministério da Economia e do Ambiente-Portugal. Decreto-Lei nº 118/2013, 2013.

Anexo A: Propriedades dos materiais de construção da TDF

Na figura A.1 pode-se observar uma representação esquemática dos painéis CSIP's que constituem a casa modelo. Na figura A.2 está presente uma fotografia de corte do painel composto.

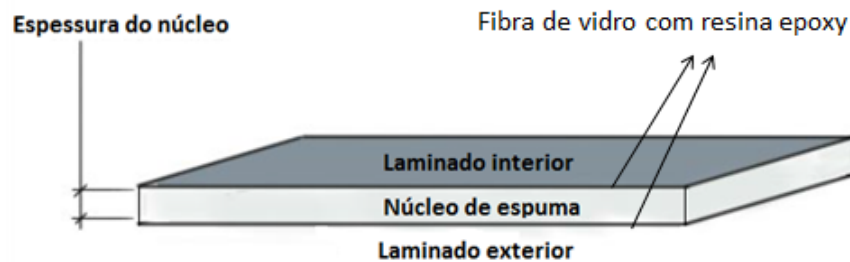


Figura A.1: Representação esquemática dos painéis CSIP's, (Adaptado de [16]).

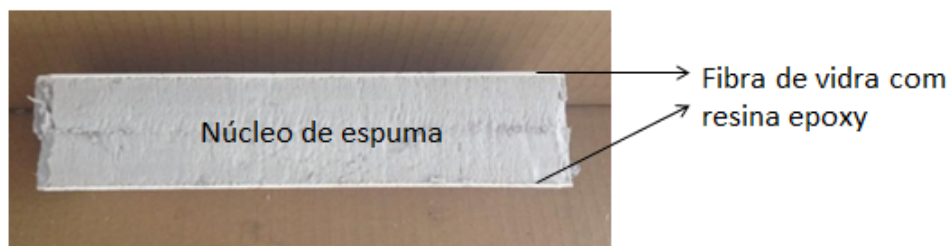


Figura A.2: Vista em corte de um painel CSIP.

Tabela A.1: Propriedades gerais dos painéis CSIP's, (Adaptado de [16]).

Descrição do material	Painel compósito ultra leve em sandwich usado para construção	
Propriedade	Valor	Observações
Densidade	71-122 [kg/m^3]	Densidade média dependendo dos requisitos do cliente
Comportamento ao fogo	Não-inflamável	Testes passados: ASTM D 635 e ASTM D 2843
Resistência á agua	Sim	Testes passados: ASTM E 331 Revestimentos espaciais a aplicar no caso de pontões
Intervalo de temperaturas aplicável	-70 °C – +130 °C	-
Resistência química	Resistente a todos os químicos não agressivos e água salgada	Sem adição de revestimento especial ou tratamento térmico
Absorção do som	< 28 dB	Sem adição de revestimento especial ou tratamento térmico
Resistência a animais e outros	Impenetrável a térmitas, ratos e ratazanas, não é afectado por bolor e outros fungos	Sem adição de revestimento especial ou tratamento térmico

Tabela A.2: Propriedades mecânicas dos painéis CSIP's, (Adaptado de [16]).

Tipo de painel	Propriedade mecânica	Valor	Normalização
1 a 3 camadas laminadas	Tensão limite de elasticidade (laminado de fibra de vidro)	303,4 [MPa]	ASTM D 638
1 a 3 camadas laminadas	Resistência à compressão (laminado de fibra de vidro)	289,6 [MPa]	ASTM D 3410
62P40G1 (PU)	Resistência à compressão (perpendicular ao laminado de fibra de vidro)	0,186 [MPa]	ASTM D 1621
62X35G1 (XPS)	Resistência à compressão (perpendicular ao laminado de fibra de vidro)	0,287 [MPa]	ASTM D 1621
62X35G1-S50	Resistência á flexão	4,021 [kN.m] (por metro de largura)	ASTM C 393
62X35G1-S50	Resistência axial	16,9 [kN.m] (por metro de comprimento)	ASTM E 72
Ligação entre as camadas laminadas	Tensão de cisalhamento	20.68 [MPa]	ASTM C 393

Tabela A.3: Propriedades térmicas dos painéis CSIP's, (Adaptado de [16]).

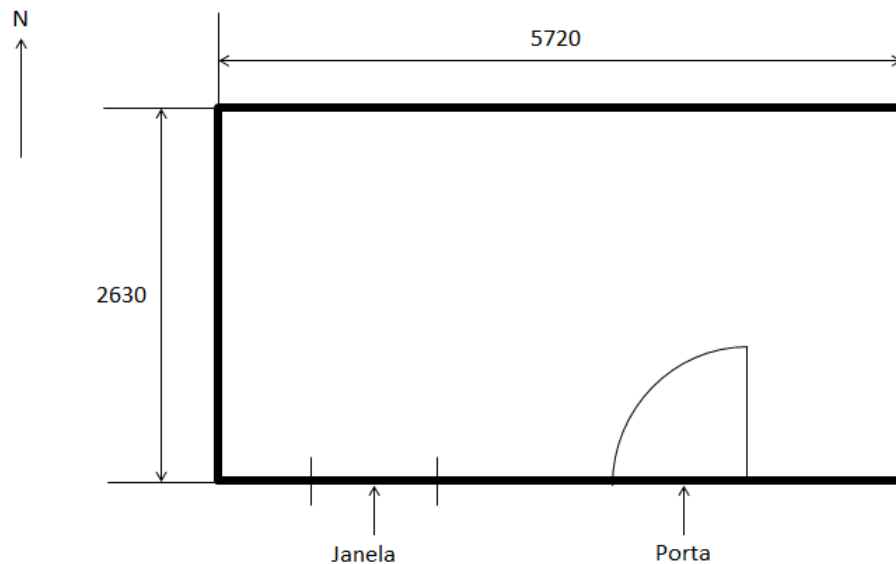
Tipo de painel	Núcleo	Espessura do núcleo [mm]	Condutividade Térmica [W/mK]*	Resistência Térmica [m²K/W]**
62P40G1	Poliuretano	62	0,030	2,0
104P40G1	Poliuretano	104	0,030	3,33
62X35G1	Poliestireno extrudido	62	0,035	1,71
62X35G1	Poliestireno	62	0,040	1,5

* Baseado nas informações dos fornecedores

** Baseado em cálculos

Anexo B: Configurações espaciais das sondas de recolha de ar

No presente anexo aprestam-se as quatro configurações espaciais das sondas de recolha de ar implementadas. Todas as distâncias estão expressas em milímetros sendo importante também referir que todas as sondas de recolha de ar situavam-se uma distância de 1750 [mm] do pavimento da TDF.



Legenda:



-  → Ponto de recolha de ar
-  → Ventilador

Figura B.1: Planta da TDF.

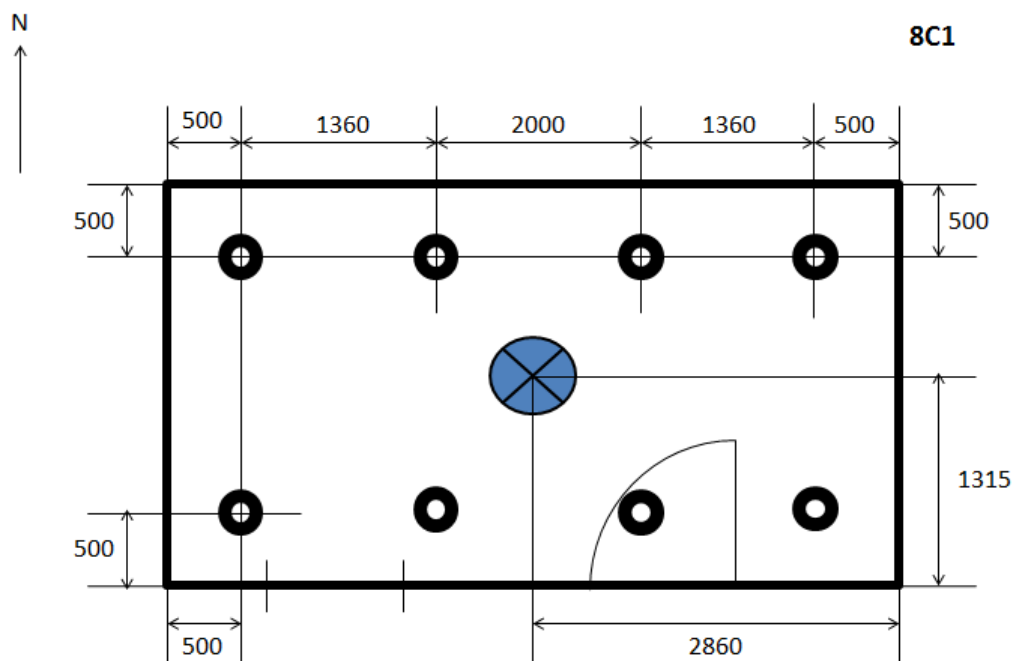


Figura B.2: Representação esquemática da configuração 8C1

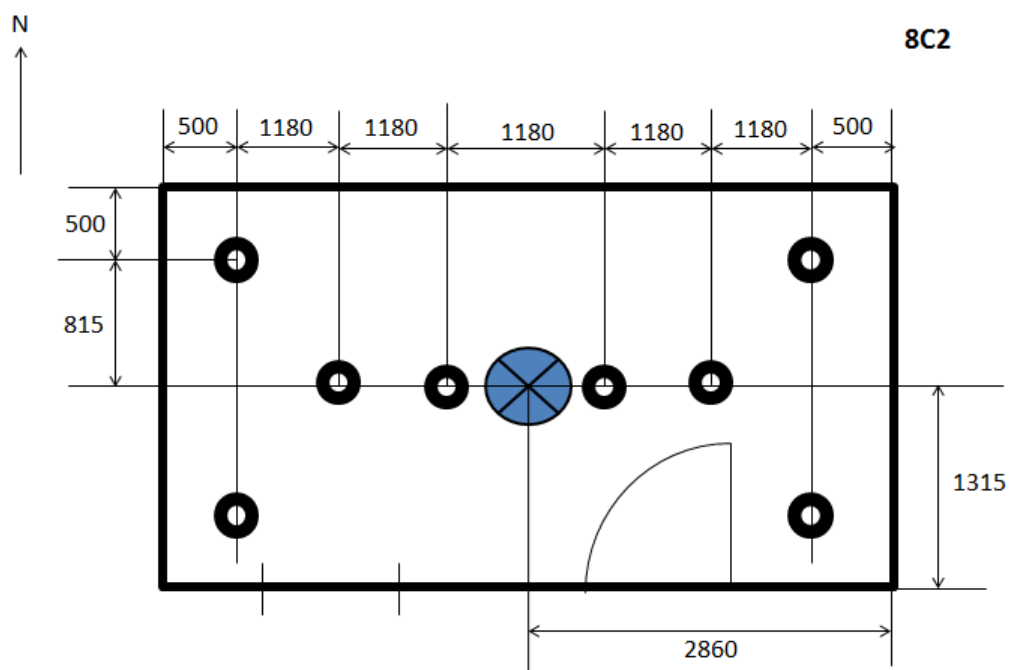


Figura B.3: Representação esquemática da configuração 8C2

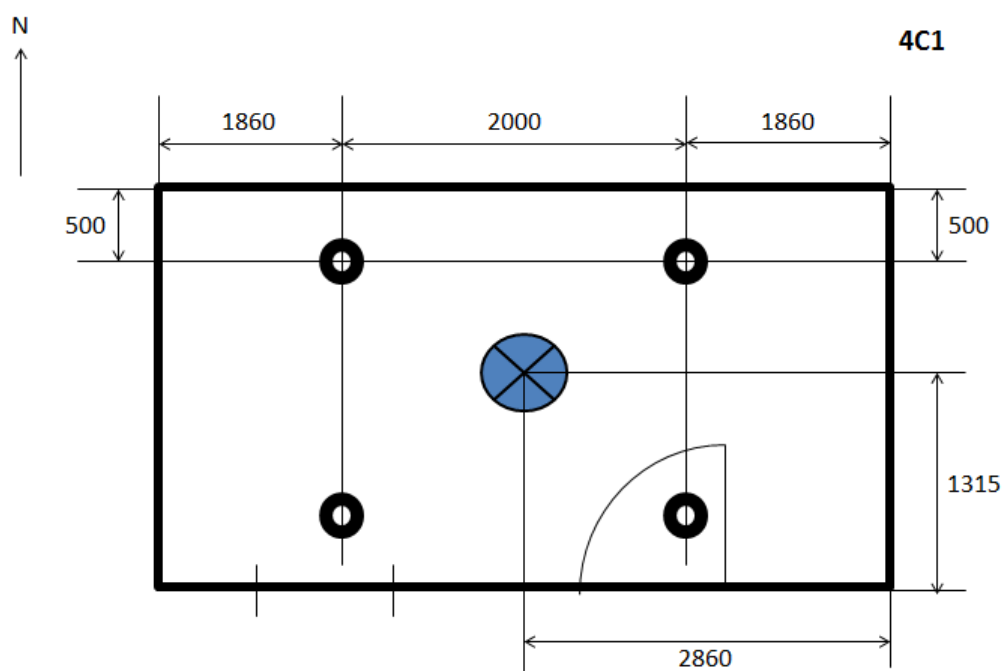


Figura B.4: Representação esquemática da configuração 4C1

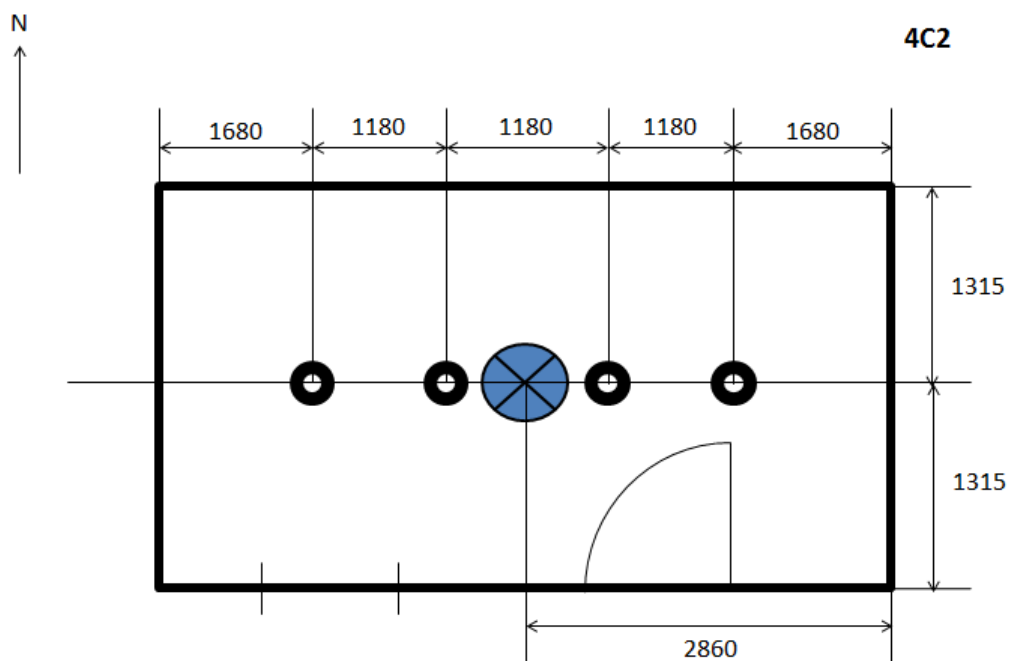


Figura B.5: Representação esquemática da configuração 4C2

Anexo C: Curvas de calibração do ventilador

Na tabela C.1 apresenta-se as curvas de calibração do ventilador utilizado nos ensaios da porta ventiladora.

Tabela C.1: Curvas de calibração do ventilador [22].

Curvas de calibração do ventilador	
Nº de furos obturados	Curva de calibração $\dot{V} = a \cdot (\Delta P_{VENT})^b - [\text{ft}^3/\text{min}]$
0	$\dot{V} = 97,7 \cdot (\Delta P_{VENT})^{0,486}$
4	$\dot{V} = 64,4 \cdot (\Delta P_{VENT})^{0,465}$
6	$\dot{V} = 36,9 \cdot (\Delta P_{VENT})^{0,479}$
7	$\dot{V} = 16,16 \cdot (\Delta P_{VENT})^{0,461}$
8	$\dot{V} = 25,1 \cdot (\Delta P_{VENT})^{0,458}$

Anexo D: Condições meteorológicas durante os ensaios dos gases traçadores

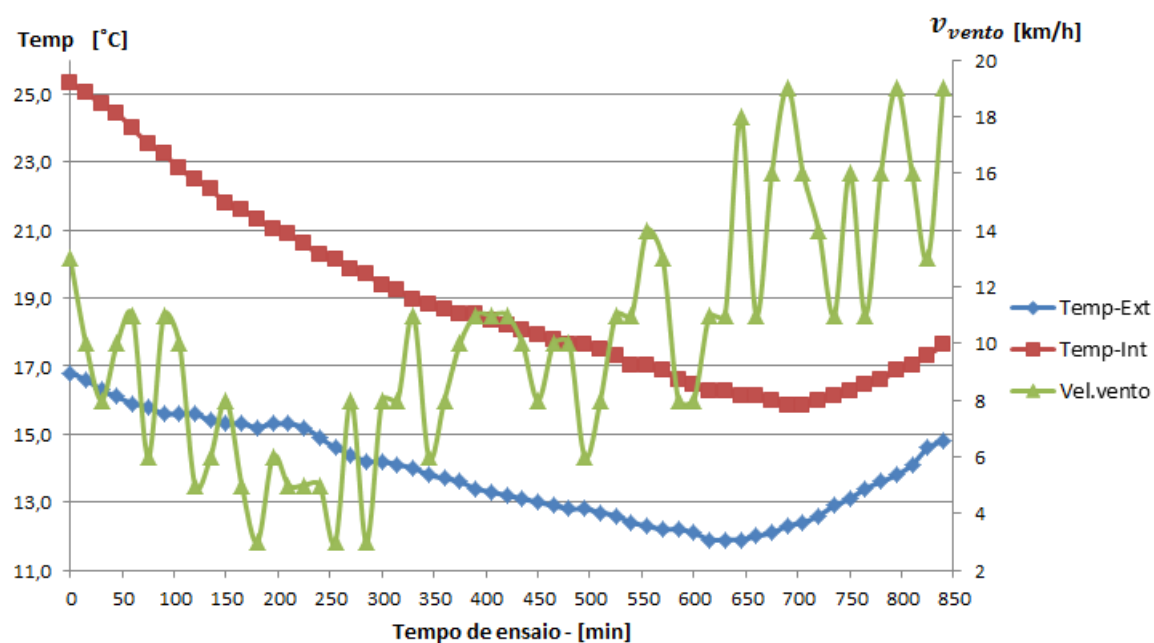


Figura D.1: Condições meteorológicas durante o ensaio A.

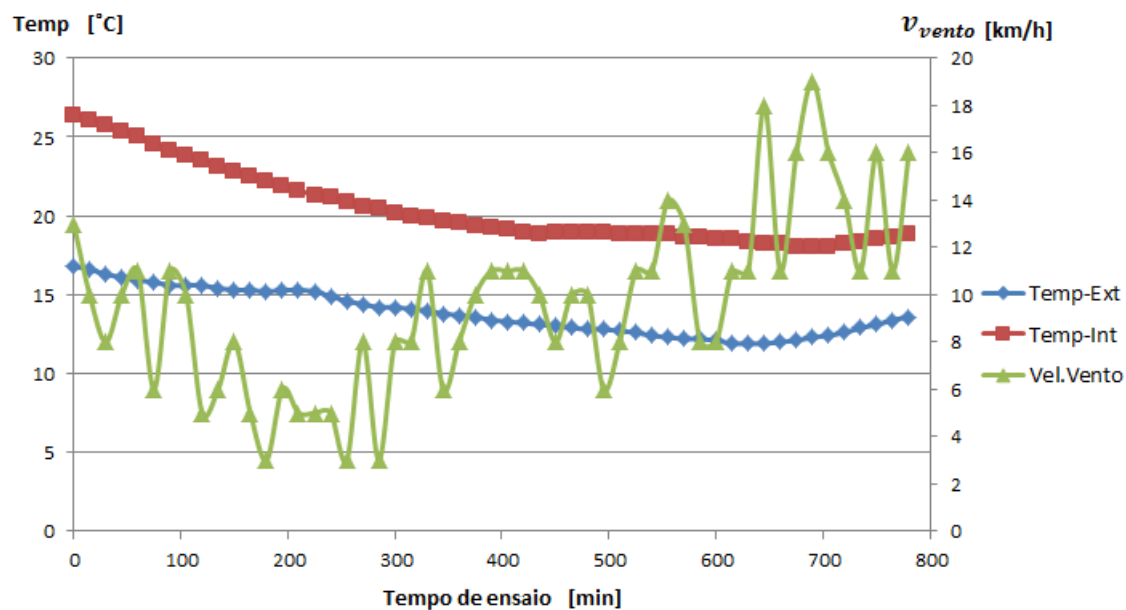


Figura D.2: Condições meteorológicas durante o ensaio B.

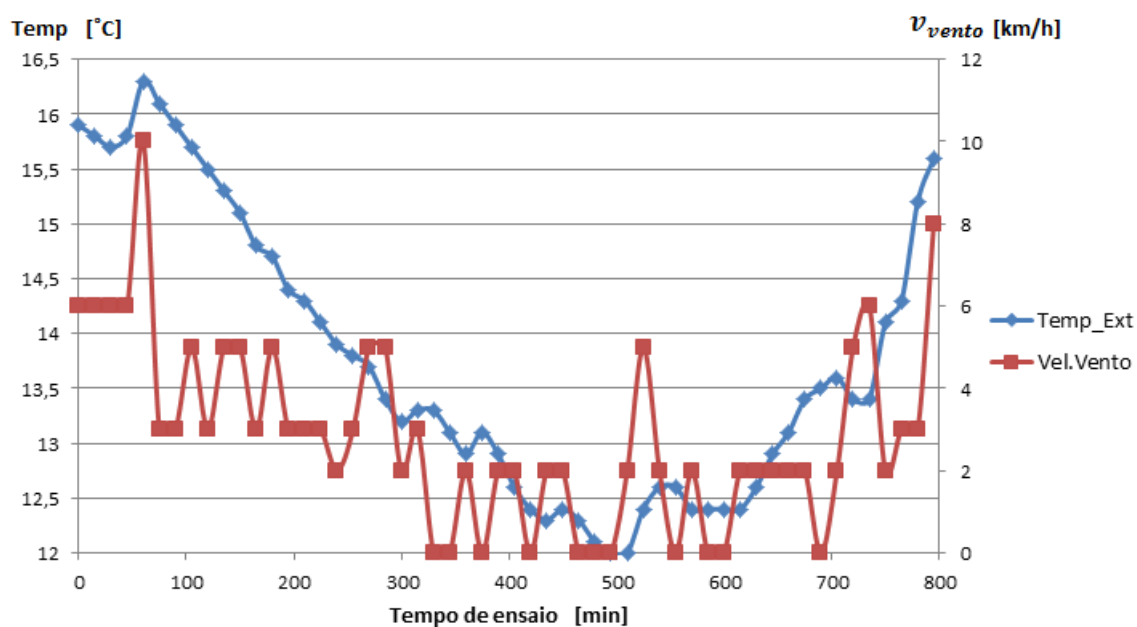


Figura D.3: Condições meteorológicas durante o ensaio C.

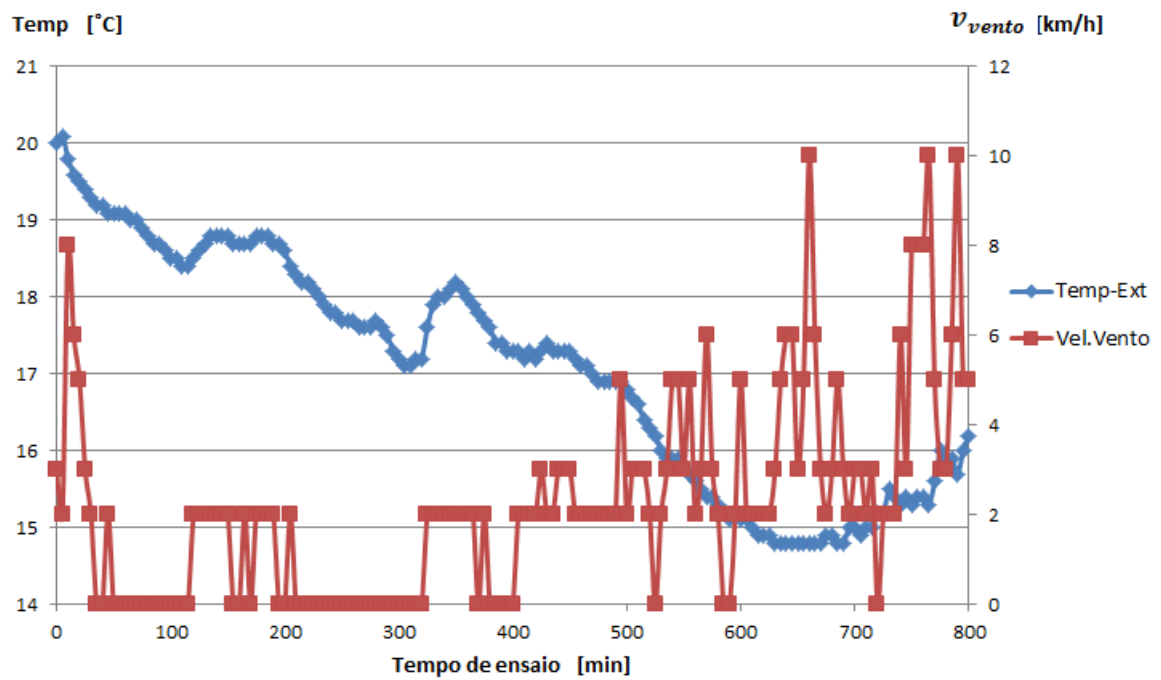


Figura D.4: Condições meteorológicas durante o ensaio D.

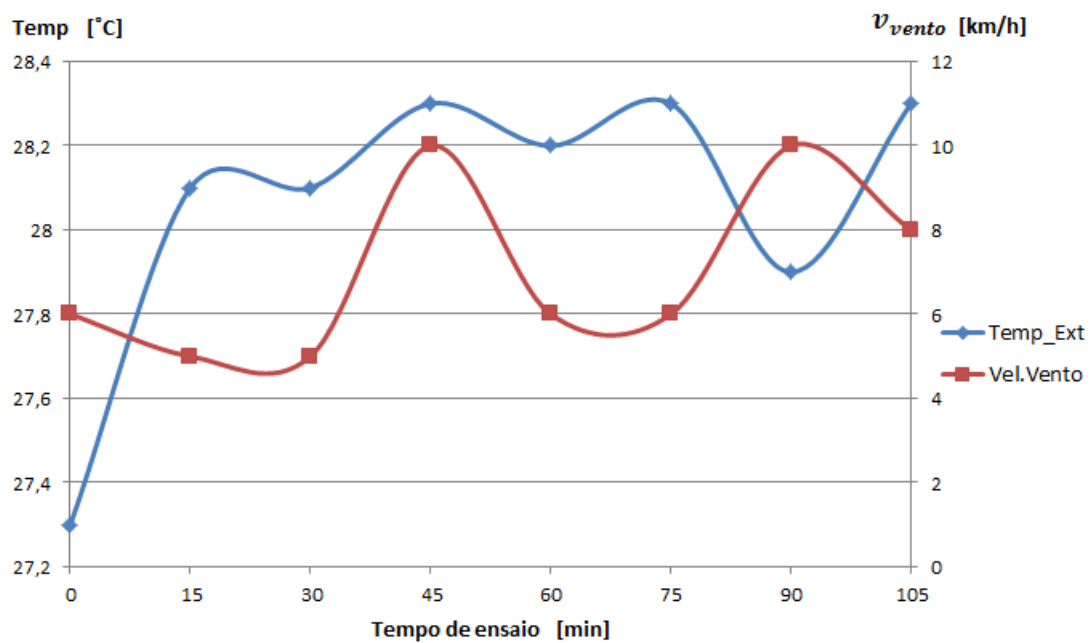


Figura D.5: Condições meteorológicas durante o ensaio E.

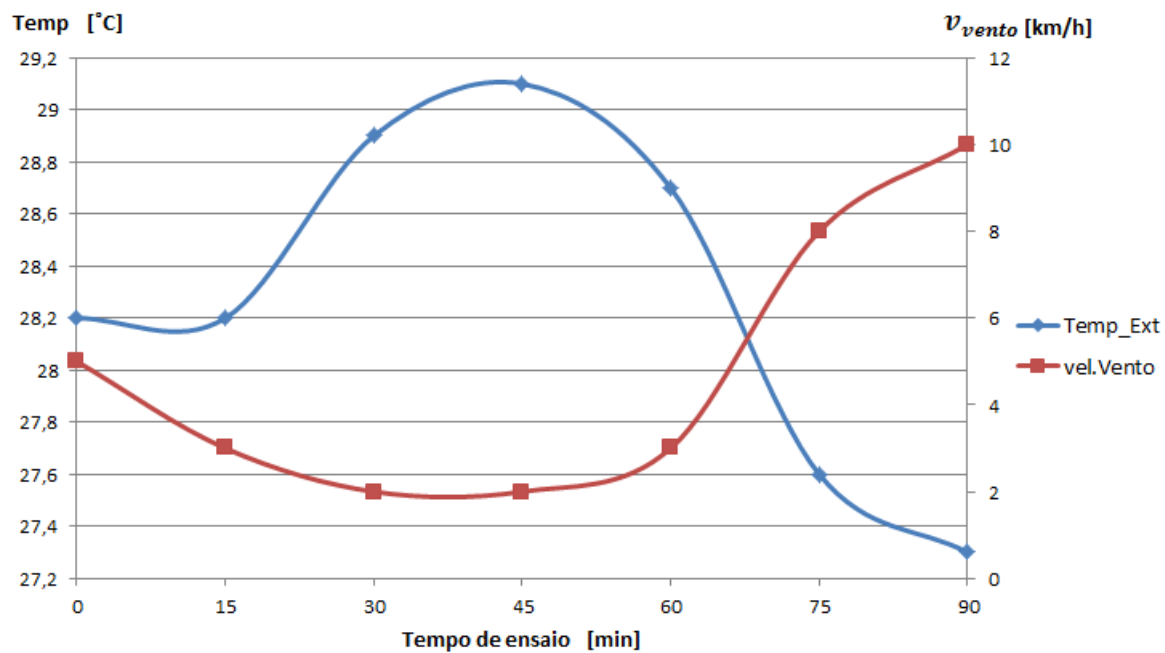


Figura D.6: Condições meteorológicas durante o ensaio F.

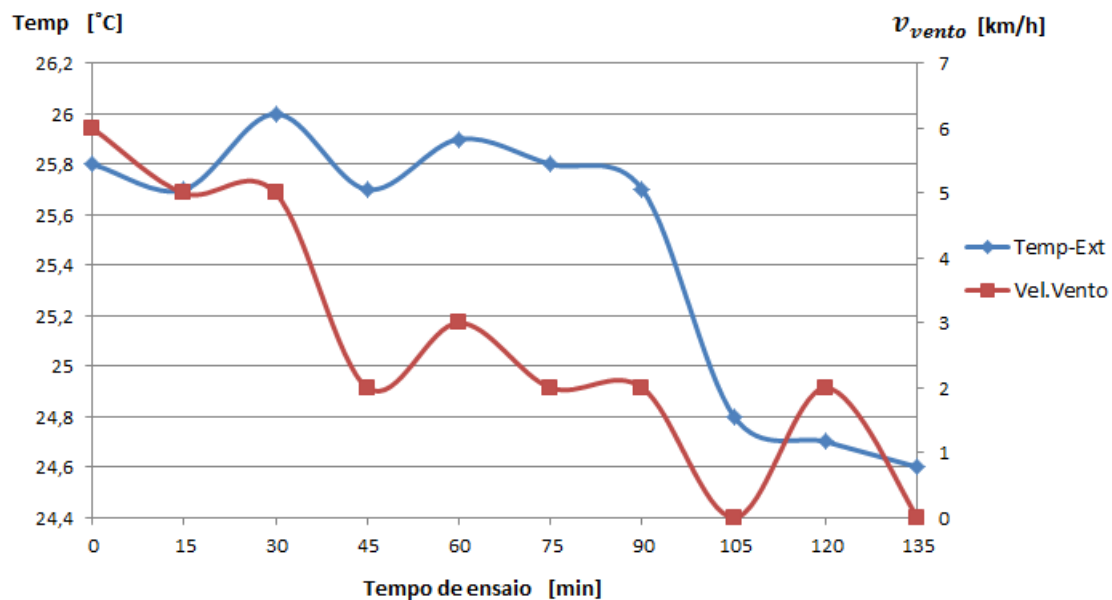


Figura D.7: Condições meteorológicas durante o ensaio G.

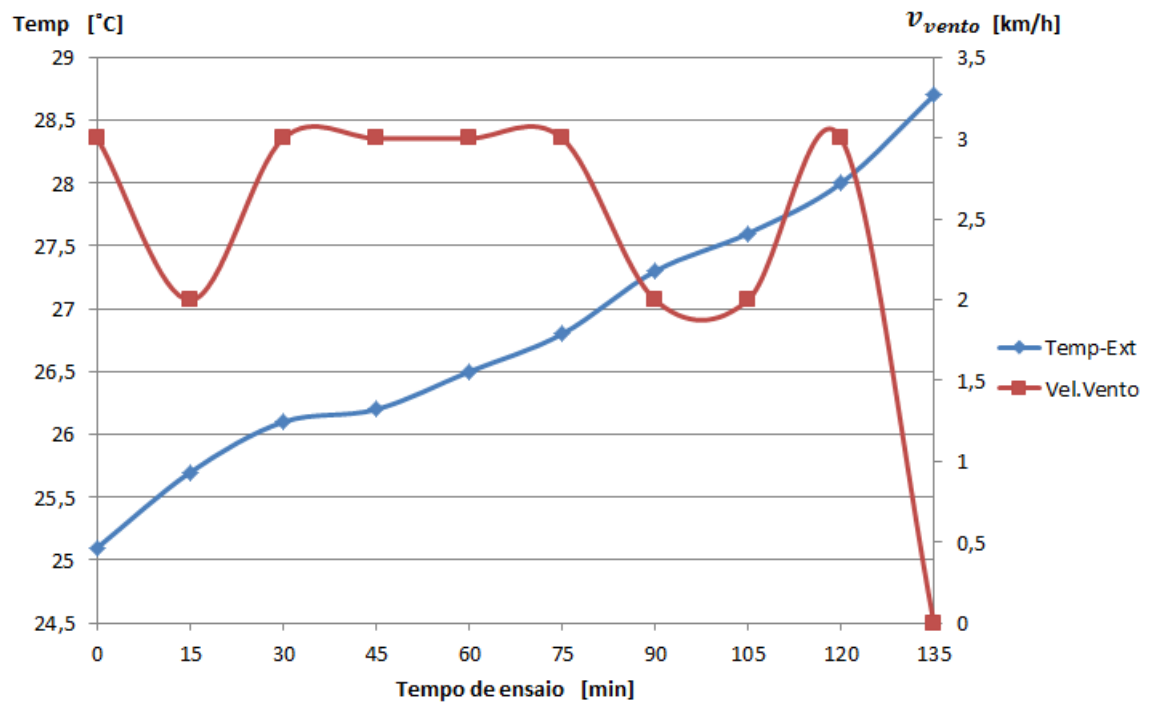


Figura D.8: Condições meteorológicas durante o ensaio H.